TEXTE 101/2018

Technische Aspekte der Überwachung der akustischen Qualität der Fahrwege im Straßenverkehr

Abschlussbericht



TEXTE 101/2018

Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 54 100 0 UBA-FB 002661

Technische Aspekte der Überwachung der akustischen Qualität der Fahrwege im Straßenverkehr

von

Johannes Masino, Dr.-Ing. Michael Frey, Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel: +49 340-2103-0 Fax: +49 340-2103-2285 info@umweltbundesamt.de Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Institut für Fahrzeugsystemtechnik Teilinstitut Fahrzeugtechnik Kaiserstr. 12 76131 Karlsruhe

Abschlussdatum:

März 2018

Redaktion:

Fachgebiet I 2.3 Lärmminderung im Verkehr Dr. Lars Schade

Publikationen als pdf: http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Dezember 2018

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Umweltforschungsplans (UFOPLAN) 2014 wurde eine Methode zur flächenhaften Erfassung des akustischen Zustandes der Fahrwege im Straßenverkehr entwickelt. Die "Akustische Torusmessmethode" beschreibt ein Verfahren, das durch die Messung des Reifeninnengeräuschs eine Beschreibung für das nach außen abgestrahlte Reifen-Fahrbahn-Geräusch ermöglicht. Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hat in einem vorausgegangenen Projekt ein praxistaugliches Messgerät für dieses Verfahren erarbeitet, welches für das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Umweltbundesamtes weiterentwickelt wurde. Dies betrifft insbesondere die Energie- und Datenverwaltung zur Realisierung eines über möglichst lange Zyklen wartungsfreien Betriebs der Messsysteme. Weiterhin wurde eine kontinuierliche Analyse der eingehenden Daten von einem Fahrzeugschwarm konzipiert und realisiert. So wurde sichergestellt, dass während der Datenaufzeichnung sinnvoll nachgesteuert werden kann, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu maximieren.

Abstract

Within the framework of the Environmental Research Plan (UFOPLAN) 2014, a method was developed to determine the acoustic condition of the roads in road traffic. The "Acoustic Torus Measurement Me-thod" describes a procedure which, by measuring the inner tyre noise, enables a description of the tyre noise emitted to the outside of the tyre. In a previous project, the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) has developed a practical measuring instrument for this method, which has been further developed for the research and development project of the Federal Environment Agency. This applies in particular to energy and data management for the realization of maintenance-free operation of the incoming data was conceived and implemented by a vehicle swarm. In this way, it was ensured that meaningful post-control can be carried out during data recording in order to maximise the significance of the results.

Inhaltsverzeichnis

dungsverz	zeichnis6
llenverzei	chnis8
rzungsver	zeichnis9
mmenfass	ung10
mary	
Einleitun	g und Projektziele21
Messtech	nnik23
2.1	Konzept23
2.2	Untersuchung der Sensoren24
2.2.1	Inertialsensor24
2.2.2	Akustiksensor
2.2.3	GPS41
2.2.4	RDKS
2.3	Datenbank42
2.4	Hardware43
2.5	Software45
Datenaus	swertung47
3.1	Einflussfaktoren47
3.2	Schätzung des Fahrbahnzustandes49
3.2.1	Inertialsensordaten
3.2.2	Akustiksensordaten
3.3	Erkennung von Fahrbahnereignissen
3.4	Erkennung der Fahrbahnrauigkeit52
Ergebniss	se54
4.1	Schätzung des Fahrbahnzustandes54
4.2	Erkennung von Fahrbahnereignissen55
4.3	Erkennung der Fahrbahnrauigkeit
Zusamme	enfassung und Ausblick59
Quellenv	erzeichnis61
Anhang A	A: Aufbau und Inbetriebnahme der Messsysteme62
	dungsverz Ilenverzeie rzungsver mmenfass mary Einleitun Messtech 2.1 2.2 2.2.1 2.2.2 2.2.3 2.2.4 2.3 2.2.4 2.3 2.4 2.5 Datenaus 3.1 3.2 3.2.1 3.2.2 3.3 3.4 Ergebniss 4.1 4.2 4.3 Zusamme Quellenv Anhang A

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Gesamtkonzepts	24
Abbildung 2: Vergleich der Signale des Referenz und MEMS Inertialsensors	25
Abbildung 3: Anordnung der Mikrofonpole und Schaltplan eines üblichen Mikrofonverstärkers	27
Abbildung 4: Anordnung der neu konfigurierten Mikrofonpole und Schaltplan des Linkwitz- Mikrofonverstärkers	28
Abbildung 5: Messfelge und Mikrofone	30
Abbildung 6: Fundamentale und Harmonische bei Anregung des INMP411 mit 1 kHz und 110 dB zur Ermittlung der THD	31
Abbildung 7: Vergleich der Frequenzgänge aller sechs Mikrofone im Freifeld	33
Abbildung 8: Vergleich der gemessenen Schalldruckpegel bei Impulshammeranregung aller sechs Mikrofone über der Zeit	35
Abbildung 9: Vergleich der geglätteten Schalldruckpegel des PCB von Kopfsteinpflaster und Asphalt	36
Abbildung 10: Vergleich der Frequenzgänge im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 2.000 Hz	37
Abbildung 11: Vergleich der gemessenen Spektrogramme des PCB und des CMA-M	38
Abbildung 12: Adapter (grau) für Kabeldurchführung (rot) und Einschraubventil (gelb)	40
Abbildung 13: Adapter mit Kabeldurchführung und Einschraubventil	41
Abbildung 14: Genauigkeit der Position und Geschwindigkeit des GPS	41
Abbildung 15: Reifentemperatur und Druck mit einem TPMS aufgezeichnet	42
Abbildung 16: Funktionsdiagramm der entwickelten Datenakquisition	43
Abbildung 17: Messeinheit	44
Abbildung 18: Telemetrie ohne und mit Fahrzeugrad	44
Abbildung 19: Struktur des zentralen Messwerterfassungsservices sensorrecorder.py	46
Abbildung 20: Fahrzeugbewegung durch Straßenhindernisse für verschiedene Geschwindigkeiten	47
Abbildung 21: Ergebnisse der Untersuchung von Einflussfaktoren auf das SPL des Reifenholraumgeräusches	48
Abbildung 22: Lineare und nicht-lineare Regression für SPL und Geschwindigkeit	49
Abbildung 23: Klassifikation von Material und Ereignissen.	52
Abbildung 24: Schätzung der Straßenunebenheit in Niefern, Deutschland (rot entspricht einem schlech Straßenzustand, gelb einem mittlere, grün einem guten)	hten 54
Abbildung 25: Schätzung der Straßenunebenheit in Karlsruhe, Deutschland (rot entspricht einem schle Straßenzustand, gelb einem mittlere, grün einem guten)	echten
Abbildung 26: Klassifikationsergebnis im Südwesten von Karlsruhe, Deutschland	56
Abbildung 27: Klassifikationsergebnis in Karlsruhe, Deutschland	57
Abbildung 28: Klassifikationsergebnis in Karlsruhe, Deutschland	58
Abbildung 29: Geschätzte Regressionsfunktion zur Schätzung der Straßenrauigkeit.	59
Abbildung 30: Installation des Pis und Kopplung mit der Telemetrie	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Performance-Maße für Referenz und MEMS Inertialsensor	.25
Tabelle 2: Vergleich von ermittelter Empfindlichkeit mit den Herstellerangaben	.29
Tabelle 3: Vergleich der analysierten THD-Werte der Mikrofone bei 110 dB, 1 kHz	.31
Tabelle 4: Korrelation der Mikrofone mit dem Referenzmikrofon zwischen 200 Hz und 5.000 Hz bei 1/12 Oktavband-Glättung des Frequenzgangs	.32
Tabelle 5: Vergleich der maximal messbaren Schalldruckpegel der Mikrofone.	.34
Tabelle 6: Vergleich der gemessenen durchschnittlichen und maximalen Schalldruckpegel (SPL) aller Mikrofone auf den beiden Fahrbahnbelägen	.37
Tabelle 7: Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmaß zwischen den Frequenzgängen der Mikrofone u dem Referenzmikrofon	nd .38
Tabelle 8: Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung	.40
Tabelle 9: Untersuchte Variablen und deren Variation	.47
Tabelle 10: Untersuchte Parameter und entsprechender Regressionskoeffizient.	.48

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog Digital Wandler
CAN	Controller Area Network
ECU	elektronisches Steuergerät
FET	Feldeffekttransistor
GPS	Global Position System
IMU	inertiale Messeinheit
ISM	industriell, wissenschaftlich und medizinische Anwendung von Hochfrequenzenergie
MANOVA	Multivariate Analysis of Variances
MEMS	Mikrosystem
MPD	durchschnittliche Profiltiefe
MSE	mittlere quadratische Abweichung
NRMSE	normalisierte mittlere quadratische Abweichung
OBD	On-Board-Diagnose
RDKS	Reifendruckkontrollsystem
RMS	Quadratisches Mittel
RMSE	quadratischer mittlerer Fehler
RRI	Straßenrauigkeitsindex
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RUI	Straßenunebenheitsindex
SOC	State of Charge
SPL	Schalldruckpegel
SPL _{TC}	Schalldruckpegel des Reifeninnengeräuschs
SVM	Support Vector Machine
THD	Total Harmonic Distortion
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
Udev	userspace /dev
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung

Zusammenfassung

Die Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm liegt seit vielen Jahren auf gleichbleibend hohem Niveau. Verkehrslärm kann die Gesundheit gefährden und führt zu massiven Belästigungen und Störungen des Schlafs und der Kommunikation. Nach Umfragen des Umweltbundesamtes fühlt sich mehr als die Hälfte der Bundesbürger durch Straßenverkehrslärm belästigt. Die Verminderung der verkehrsbedingten Lärmbelästigung auf gesundheitlich unbedenkliche Werte ist daher ein übergeordnetes Schutzziel der Bundesregierung.

Bei Strategien zur Minderung der Lärmbelastung spielen Maßnahmen an der Quelle wegen ihrer hohen Wirksamkeit und ihres oftmals günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses eine zentrale Rolle. Im Bereich des Straßenverkehrslärms haben die Art der Fahrbahndeckschicht und deren Zustand einen erheblichen Einfluss auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch, das wiederum einen wesentlichen Beitrag zu den Gesamtemissionen des Straßenverkehrs leistet.

Sowohl bei der Lärmprognose im Rahmen der Planfeststellung von Straßenbaumaßnahmen als auch bei der Lärmaktionsplanung nach Umgebungslärmrichtlinie wird von einem einwandfreien Zustand der Straße ausgegangen. Gleichzeitig ist hinlänglich bekannt und wird allseits beklagt, dass der Zustand des Straßennetzes vielerorts schlecht ist. Mit "Zustand" ist in der Regel der bautechnische Zustand gemeint, und die Bedenken betreffen vorrangig die Sicherheit des Verkehrs. Doch dass eine löchrige Straße auch extrem laut ist, versteht sich von selbst. Aber noch bevor die Sicherheit einer Straße z.B. durch Schlaglochbildung beeinträchtigt wird, gehen oft möglicherweise im Neuzustand vorhandene Lärmminderungseigenschaften teilweise oder ganz verloren.

Aus Sicht des Lärmschutzes ist daher die flächendeckende Überwachung des akustischen Zustands des Straßennetzes von Interesse. Während der bautechnische Zustand des Fernstraßennetzes regelmäßig mit Messfahrzeugen überwacht wird, findet bisher keinerlei systematische Erfassung des akustischen Zustands des deutschen Straßennetzes statt. Dies liegt unter anderem daran, dass eine solche Erfassung mit klassischen Verfahren wie dem SPB- oder dem CPX-Verfahren eine messtechnische Herausforderung wäre, für die weder Mittel noch Messtechnik in ausreichendem Maß vorhanden ist. An hat dieses Forschungsvorhaben angesetzt.

Das übergeordnete Ziel des Projekts ist es, die Grundlagen für ein neues Verfahren zur flächenhaften Erfassung des akustischen Zustands des Straßennetzes zu legen und erste Erfahrungen mit dem Verfahren zu sammeln. Der zentrale Unterschied des neuen Verfahrens im Vergleich zu klassischen Verfahren besteht darin, dass anstelle einiger weniger, hochpräziser aber teurer Messsysteme, die eine Bedienung durch Experten erfordern, eine große Anzahl preiswerter, robuster und weitgehend automatisierter Messsysteme von Laien im Verkehr bewegt wird. Für Einzelmessungen sind diese Systeme weniger geeignet, dafür ergeben sich bei ausreichender Redundanz vieler Einzelmessungen über eine geeignete statistische Auswertung wiederum präzise flächendeckende Aussagen zum akustischen Zustand des Straßennetzes, und das zu erschwinglichen Kosten.

Das eben skizzierte übergeordnete Ziel des Projekts bildet die Leitlinie für die beiden im Projekt konkret zu erreichenden Ziele.

Das erste konkrete Ziel betrifft die Messtechnik. Die messtechnische Basis des Projekts bildet die akustische Torusmessmethode, kurz ATM-Methode. Dabei wird mit einem an der Felge des Messfahrzeugs montierten Mikrofon das Reifeninnengeräusch erfasst, aus dem sich Aussagen über die akustisch relevante Fahrbahntextur ableiten lassen. Der Reifeninnengeräuschpegel wird natürlich stark von der Bauart und Größe des Reifens und seinem Profil beeinflusst – der Reifen ist somit integraler Bestandteil des Messsystems.

Da das Messsystem auf verschiedenen Fahrzeugen über längere Zeiträume weitgehend automatisiert arbeiten soll, ist der am Institut für Fahrzeugsystemtechnik entwickelte Prototyp des Messsystems in

Richtung eines zukünftigen Masseneinsatzes weiterzuentwickeln. Dabei ist sicherzustellen, dass das System möglichst wartungsfrei arbeitet.

Das zweite konkrete Ziel betrifft die Datenauswertung. Idealerweise werden die von den verschiedenen Messsystemen gesammelten Daten regelmäßig automatisch auf einen zentralen Server geladen. Damit könnten möglicherweise auftretende technische Probleme an Messsystemen bereits innerhalb eines Wartungszyklus und nicht erst an dessen Ende erkannt werden. Außerdem würde es eine zeitnahe Auswertung der Messdaten erlauben, gegebenenfalls innerhalb des Projekts Korrekturen an der Messstrategie vorzunehmen.¹

Um Daten unter realen Bedingungen mit mehreren Fahrzeugen umfassend zu erfassen und eine Überwachung der Straßeninfrastruktur in kurzen Zeitabständen zu ermöglichen, muss ein Messsystem die folgenden Anforderungen erfüllen:

- ► automatische Datenerfassung ohne manuelle Eingriffe,
- ▶ automatische Datenübermittlung an eine zentrale Datenbank in kurzen Zeitabständen,
- ▶ niedrige Investitionskosten pro Einheit.

Die zentrale Komponente des Messsystems ist ein Datenlogger, der selbst programmiert werden kann. An diesen wird ein GPS-System und ein Inertialsensor angeschlossen. Der Inertialsensor wird fest im Fahrzeug verbaut, sodass das Koordinatensystem identisch mit dem fahrzeuggebundenen Koordinatensystem ist. Mit diesem können Inertialsensordaten in x-, y-, und z-Richtung erfasst, und später analysiert werden.

Da Längs- und Querbeschleunigungen am Fahrzeug Einfluss auf das Reifentorusgeräusch haben, können Streckenabschnitte betrachtet werden, bei denen keine Beschleunigungsvorgänge aufgetreten sind. Zusätzlich können diese Abschnitte gezielt mit Fahrsituationen verglichen werden, bei denen Beschleunigungen stattgefunden haben.

Das GPS-System gibt die auf 3 Metern genaue Position des Fahrzeugs, sowie dessen Geschwindigkeit wieder. Letztere Größe ist ebenfalls für die Auswertung des Reifentorusgeräuschs wichtig und wird als Kontrollvariable erfasst und analysiert.

Eine weitere Komponente des Gesamtsystems ist das direkte Tire-Pressure-Monitoring-System (TPMS), bzw. Reifendruckkontrollsystem (RDKS). Bei einem direkten TPMS wird ein Sensor an das Reifenventil geschraubt, welcher die Reifeninnenlufttemperatur und den Reifendruck erfasst. Diese Größen, welche ebenfalls das Reifentorusgeräusch beeinflussen, werden zusammen mit einer ID in gewissen Intervallen über Funk (433 MHz) an einen Empfänger übertragen. Die am Markt erhältlichen RDKS zeigen die Werte für den Benutzer nur an und werden nicht gespeichert.

Am Rad wird außerdem das Torusmikrofon, sowie die Datenerfassung und Telemetrie des akustischen Signals angebracht. Die Kommunikation zwischen Datenlogger und Datenerfassung des akustischen Signals wird aufgrund der hohen Datenübertragungsrate per Bluetooth erfolgen.

Das gewichtete Quadratische Mittel (RMS) der Beschleunigung wird verwendet, um die Schwingung des Fahrzeugs aufgrund von Straßenrauigkeit und Hindernissen zu bewerten. Das laufende gewichtete RMS berücksichtigt gelegentliche Schocks und transiente Schwingungen, z.B. durch Schlaglöcher. Es wird ausgedrückt in m/s² für translatorische Schwingung und rad/s² für die Rotationsschwingung. Das laufende gewichtete RMS der Beschleunigung wird aus der Vertikalbeschleunigung und der Rollbeschleunigung der Fahrzeugkarosserie berechnet, um die Schwingungen aufgrund von Rauheit und einspurigen Hindernissen wie Schlaglöchern zu erfassen. Um die Empfindlichkeit der Geschwindigkeit auf die Schwingung des Fahrzeugs zu reduzieren, wird ein statistisches Daten-Binning angewendet

¹ Textstellen der bisherigen Zusammenfassung wurden aus der Projektskizze zum Projekt "Überwachung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels ATM-Messungen" vom 16.09.2014 (UFOPLAN 3714 54 1000) übernommen.

und die laufende gewichtete RMS der Beschleunigung in Bins mit Geschwindigkeitsintervallen gruppiert.

Die Geschwindigkeits-Bins sind frei definierbar. Eine gute Option könnte jedoch sein, Geschwindigkeits-Bins zu definieren, die Geschwindigkeitsintervalle für 30 km/h Zonen, innerstädtische Straßen, Landstraßen und Autobahnen darstellen. Für jeden Geschwindigkeits-Bin und für die normalisierte Vertikal- und Rollbeschleunigung wird ein Score ermittelt. Der finale Score, der als Straßenunebenheitsindex (RUI) bezeichnet wird, ist das Maximum der normierten Vertikal- und Rollbeschleunigung und reicht von 0 bis 1.

Die Daten des Akustiksensors im Reifenhohlraum werden mit der gleichen Methode verarbeitet, wie sie für den Inertialsensor beschrieben wurde. Jedoch basieren sie hauptsächlich auf dem SPL des Reifenhohlraumgeräusches als Merkmal. Dabei geht es eher darum, Oberflächen mit unterschiedlichen Makrotexturen und damit einem Straßenrauigkeitsindex (RRI) zu schätzen, als Straßenhindernisse oder Unebenheiten zu erkennen. Allerdings ist das SPL Merkmal empfindlicher auf die Geschwindigkeit und deshalb werden feinere Geschwindigkeitsintervalle mit 2 m/s Schritten verwendet.

Darüber hinaus werden die Daten nach Reifentemperatur, Reifendruck und Fahrzeuglast gefiltert, um nur vergleichbare Bedingungen zu berücksichtigen und Daten, die unter extremen Bedingungen gewonnen wurden, zu vermeiden. Zum Beispiel nimmt der Reifenhohlraum beim Parken des Fahrzeugs eine ähnliche Temperatur der Umgebung an, die von -10 Grad Celsius im Winter bis 40 Grad Celsius im Sommer reichen kann. Jedoch haben mehrere Untersuchungen in unterschiedlichen Umgebungsbedingungen gezeigt, dass die Temperatur ungefähr konstant bei 35 bis 40 Grad Celsius nach 10 Minuten Fahrt bleibt. Folglich werden der Beginn einer Fahrt und längere Stopps, wenn die Reifentemperatur wieder sinkt, analog zum Reifendruck herausgefiltert, der ungefähr der Kurve der Reifentemperatur folgt.

Annotierte Daten ermöglichen die Detektion spezifischer Objekte oder Fahrbahnbeläge mit spezifischen Eigenschaften durch überwachte Klassifizierung oder die Abschätzung der Straßenrauheit durch überwachte Regression. Der wichtigste Teil der Verarbeitung von annotierten Daten besteht darin, Merkmale zu finden, die die gewünschten Klassen im Merkmalsraum trennen können. Erstens werden die Kandidaten von Merkmalen auf der Grundlage theoretischer und physikalischer Überlegungen oder der Analyse von Daten aus Voruntersuchungen, die als Feature Engineering bezeichnet werden, gebildet. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Feature-Learning-Techniken, um automatisch Darstellungen der Rohdaten für die Klassifizierung zu finden. Letzteres wird in diesem Projekt jedoch nicht berücksichtigt. Die Merkmals-Kandidaten werden automatisch mit der Methode MANOVA bewertet und die besten Features zur Trennung der Klassen werden ausgewählt, um die Dimension des Merkmal-Vektors zu reduzieren und eine Überanpassung zu vermeiden. Überarbeitete Modelle haben eine schlechte Verallgemeinerung mit zu vielen Parametern im Vergleich zur Anzahl der Beobachtungen. Dann beschreibt das Modell eher zufälliges Rauschen als die zugrundeliegende Beziehung.

Es ist schwierig, den Merkmalsraum mit höheren Dimensionen zu veranschaulichen. Daher kann sie durch Merkmalsaggregation weiter reduziert werden, z.B. durch die Diskriminanzfunktionsanalyse. Damit kann der aggregierte Merkmalsraum mit z.B. zwei Dimensionen visualisiert und untersucht werden, ob die Klassen trennbar sind. Der Nachteil dieser Methode ist eine Abnahme der Genauigkeit der Klassifizierung und die schwierige Interpretation der aggregierten Merkmale.

Schließlich wird die Regression oder Klassifizierung mit einer Support Vector Machine (SVM) durchgeführt. Dieses Projekt unterscheidet zwischen der Klassifizierung von Straßenobjekten, Straßenzustand oder einzelnen Hindernissen wie Schlaglöchern und der Abschätzung der Straßenrauigkeit innerhalb der Makrotextur. Die Objekterkennung basiert auf der vom Trägheitssensor gemessenen Schwingung der Fahrzeugkarosserie, während die Straßenrauigkeitsschätzung auf der vom Reifenhohlraumgeräusch erfassten Reifenschwingung basiert. Daher besteht der erste Datensatz aus den Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten des Fahrzeugs in drei Richtungen und dem zweiten aus dem Schalldruck des Reifenhohlraums. Beide Datensätze werden um abhängige Parameter erweitert, wie z.B. die Fahrzeuggeschwindigkeit.

Für die Merkmalsextraktion von Inertialsensordaten werden die folgenden Distanzseriendaten berücksichtigt:

- Vertikalbeschleunigung,
- ► Rollrate,
- Nickrate.

Darüber hinaus wird die Roll- und Nickbeschleunigung sowie der Ruck des Fahrzeugs mit der Ableitung der Vertikalbeschleunigung im Zeitbereich berechnet. Mit der Kurzzeit-Fourier-Transformation werden die Distanzseriendaten in den Frequenzbereich transformiert. Hiermit können Eigenschaften, die auf bestimmten Frequenzbändern beruhen, untersucht werden. Daher werden die drei Distanzseriendaten um die folgenden Datenströme erweitert, was uns zu insgesamt 7 Datenströmen führt:

- Rollbeschleunigung,
- Nickbeschleunigung,
- Vertikalbeschleunigung,
- ► Ableitung der Vertikalbeschleunigung,
- ► Kurzzeit Fourier transformierte Vertikalbeschleunigung,
- ► Kurzzeit Fourier transformierte Nickbeschleunigung,
- ► Kurzzeit Fourier transformierte Rollbeschleunigung.

Die Merkmale werden für Fenster mit einer bestimmten Länge im Entfernungsbereich und einer bestimmten Überlappung berechnet. Wird ein größerer Abstand gewählt, haben kurze Amplituden, z.B. durch Schlaglöcher, einen schwächeren Einfluss auf den Wert von Merkmalen, die das Gesamtsignal enthalten, wie z.B. die Standardabweichung. Diese kurzen Amplituden können durch Verkürzung der Fenstergröße oder durch die Verwendung von Merkmalen, die Extrema berechnen, erfasst werden.

Aus den Daten der Distanzserien berechnen wir die

- Standardabweichung,
- Peak-to-peak,
- Durchschnitt.

Für die kurzzeitig transformierten Fourier-Daten und den Spektralschwerpunkt extrahieren wir die Merkmale

- Durchschnitt
- Standardabweichung
- Maximum

für den RMS der folgenden Frequenzbänder (1/m): [0,1; 0,5] [0,5;15] [15; 20] [0,1; 25] [0.1; 50]

Das beschriebene Datenverarbeitungsverfahren für die Inertialsensordaten wird analog für die Reifenhohlraumgeräuschdaten angewendet. Fahrbahnbeläge mit unterschiedlichen Eigenschaften, insbesondere mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen, können auf der Grundlage von Leistungsmerkmalen verschiedener Frequenzbänder klassifiziert werden. Dieses Projekt verfolgt die Schätzung eines Straßenrauhigkeitsindex auf der Basis der Reifenvibration, die durch das SPL des Reifenhohlraumgeräusches repräsentiert wird, und wendet eine SVM-Regression an.

Die Geschwindigkeit hat einen starken Einfluss auf den Schalldruck im Reifenhohlraum und wird als Merkmal für diese Regression aufgenommen. Weiterhin werden Reifendruck, Reifentemperatur und Fahrzeuglast berücksichtigt, obwohl der Einfluss im Vergleich zur Geschwindigkeit geringer ist.

Die Merkmale sind skaliert auf den Bereich von 0 bis 1 und eine polynominale Kernfunktion der Ordnung 2 berücksichtigt das nichtlineare Verhältnis von Geschwindigkeit und SPL des Reifenhohlraumgeräuschs. Weitere Merkmale können integriert werden, wie z.B. Reifentyp, Umgebungstemperatur, Wasser oder Schneefall, etc. Die Parameter sind für jeden Reifen und Fahrzeug unterschiedlich.

Insgesamt wurden Daten mit dem Inertialsensor als auch mit dem Akustiksensor mit verschiedenen Fahrzeugen (Ford Galaxy, Mercedes-Benz S-Klasse, Smart, VW Golf Variant, VW Golf, BMW 1er, Mercedes-Benz C-Klasse) eingefahren. Die gesammelten Daten belaufen sich auf eine Strecke von >1000 km.

Im Projekt wurden neuartige Methoden zur umfassenden und automatischen Abschätzung des Straßenzustandes mit fahrzeugbasierten Sensoren entwickelt und angewandt. Um die Daten der Sensoren zu erfassen, wurde ein kostengünstiges Messsystem für den Flotteneinsatz entwickelt. Der Installations- und Betriebsablauf des Messsystems erfordert kaum manuelle Eingriffe und die Daten können automatisch an eine zentrale Datenbank übertragen werden.

Ein Straßenunebenheitsindex (RUI) wird mit einem Trägheitssensor in der Fahrzeugkarosserie und ein Straßenrauigkeitsindex (RRI) mit einem Akustiksensor in der Reifenkavität geschätzt. Die Schätzung der Indizes basiert auf der Messung der Schwingungen von Fahrzeug und Reifen mit den genannten Sensoren.

Aus Experimenten unter kontrollierten Bedingungen wurde gezeigt, dass die Schwingungen nicht nur von der Straßenrauigkeit oder Unebenheiten abhängen, sondern auch von Einflüssen aus der Umgebung oder dem Fahrzeugbetrieb, insbesondere von der Geschwindigkeit. Um die Wirkung dieser Einflüsse zu vermindern, werden die Indizes für bestimmte Bins geschätzt, basierend auf den Haupteinflüssen. Der Vergleich mit dem Ground Truth legt nahe, dass die Schätzer mit dem tatsächlichen Straßenzustand übereinstimmen. Die Schätzer verschiedener Fahrzeuge können kombiniert und auf Karten visualisiert werden.

Für den Trägheits- und Akustiksensor wird eine überwachte Lerndatenverarbeitung zur Klassifizierung von Fahrbahnmerkmalen und Straßenrauigkeiten eingeführt. Zu den wichtigsten Neuerungen gehört eine Merkmalsauswahl mit MANOVA, um die Komplexität zu reduzieren und eine Überanpassung des Klassifikators zu vermeiden.

Die Vorhersage der Methoden wurde untersucht und die Ergebnisse deuten auf eine gute Performance hin. Generell stellt der Trägheitssensor und der Akustiksensor eine sehr gute Möglichkeit dar, Informationen über den Reifen-/Fahrbahnkontakt kostengünstig und flächendeckend zu sammeln.

Die Kombination dieser Sensoren mit einer Kamera könnte die optimale Lösung für eine mobile Auswertung des Zustands der Straßeninfrastruktur sein.

Insgesamt wurden im Projekt die angestrebten Ziele erreicht:

- Weiterentwicklung eines bestehenden Prototyps zur Aufzeichnung des Reifeninnengeräusches,
- ► Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Datenauswertung.

Die Trends Digitalisierung und Automatisierung machen nicht bei der Straßenzustandsüberwachung halt. Die derzeitige Praxis zur Bewertung der Straßeninfrastruktur ist mühsam und kostspielig. Die

entwickelten Methoden in dieser Arbeit können die gegenwärtige Praxis verbessern oder teilweise ersetzen. Die Datenverarbeitungsmethoden können auf Steuergeräten moderner Fahrzeuge, die als Sensorplattformen dienen, betrieben werden. Da das System modular aufgebaut ist, können zudem Anzahl und Art der Sensoren sowie die Sensormodalität variiert werden. Aber auch ein Fuhrpark kann mit dem vorgestellten System ausgestattet werden.

Summary

The impact of traffic noise on the population has been at a consistently high level for many years. Traffic noise can endanger health and lead to massive nuisance and disturbances of sleep and communication. According to surveys conducted by the Federal Environment Agency, more than half of all Germans feel that road traffic noise is a nuisance. The reduction of traffic-related noise pollution to levels that are harmless to health is therefore an overriding protection goal of the Federal Government.

Measures at source play a central role in strategies to reduce noise pollution because of their high effectiveness and often favourable cost-benefit ratio. In the field of road traffic noise, the type of road surface course and its condition have a considerable influence on the tyre/road noise, which in turn makes a significant contribution to the total emissions of road traffic.

It is assumed that the condition of the road is in perfect condition, both in the noise forecast within the framework of planning permission for road construction measures and in the noise action planning according to the environmental noise directive. At the same time, it is well known and widely accused that the condition of the road network in many places is poor. As a rule, the term "condition" refers to the structural condition and concerns primarily the safety of traffic. However, a boring street is also extremely noisy. Even before the safety of a road is impaired, e. g. by potholes, noise reduction properties that may be present in new condition are often lost partially or completely.

From the point of view of noise protection, the comprehensive monitoring of the acoustic condition of the road network is therefore of interest. While the structural condition of the trunk road network is regularly monitored with measuring vehicles, the acoustic condition of the German road network is not systematically recorded. One of the reasons for this is that such a recording with classical methods such as the SPB or CPX method would be a metrological challenge for which neither means nor meas-uring technology is available to a sufficient extent.

The overall objective of the project is to lay the foundations for a new method for the spatial assessment of the acoustic condition of the road network and to gain initial experience with the procedure. The main difference between the new method and classical methods is that instead of a few highly precise but expensive measuring systems requiring expert operation, a large number of inexpensive, robust and largely automated measuring systems are moved by laymen in traffic. These systems are less suitable for single measurements, but with sufficient redundancy of many individual measurements and a suitable statistical evaluation, they produce precise, area-wide statements on the acoustic condition of the road network, and this at an affordable price.

The overarching goal of the project outlined above is the guideline for the two concrete goals to be achieved in the project.

The first concrete objective concerns measurement technology. The metrological basis of the project is formed by the ATM method. A microphone mounted on the rim of the measuring vehicle is used to record the inner tyre noise, from which information about the acoustically-relevant road surface texture can be derived. The inner tyre noise level is of course strongly influenced by the design and size of the tyre and its profile - the tyre is therefore an integral part of the measuring system.

Since the measuring system is to operate largely automatically on different vehicles over longer periods of time, the prototype of the measuring system developed at the Institute for Vehicle Systems Technology is to be further developed in the direction of a future mass application. It must be ensured that the system operates as maintenance-free as possible.

The second specific objective concerns data analysis. Ideally, the data collected by the various measuring systems is automatically uploaded to a central server on a regular basis. This means that any technical problems that might occur in measuring systems can be detected within a maintenance cycle and not at the end of the maintenance cycle. In addition, a timely evaluation of the measurement data would allow corrections to be made to the measurement strategy within the project if necessary.

In order to comprehensively collect data under real-world conditions with several vehicles and to enable monitoring of the road infrastructure at short intervals, a measuring system must meet the following requirements:

- ► automatic data acquisition without manual intervention,
- automatic data transfer to a central database at short intervals,
- ► low investment costs per unit.

The central component of the measuring system is a data logger that can be programmed by the user. A GPS system and an inertial sensor are connected to the data logger. The inertial sensor is permanently installed in the vehicle, so that the coordinate system is identical to the vehicle-bound coordinate system. With this it is possible to acquire inertial sensor data in x-, y- and z-direction and to analyse them later.

As longitudinal and lateral accelerations of the vehicle have an influence on the tyre sound noise, it is possible to look at road sections where no acceleration processes have occurred. In addition, these sections can be compared with driving situations in which acceleration has occurred.

The GPS system displays the exact position and speed of the vehicle at 3 meters. The latter size is also important for the evaluation of tyre sound noise and will be recorded and analysed as a control variable.

Another component of the overall system is the direct Tire Pressure Monitoring System (TPMS). In the case of a direct TPMS, a sensor is screwed to the tire valve which measures the tire inner air temperature and tire pressure. These quantities, which also influence the tyre sound noise, are transmitted to a receiver at certain intervals via radio (433 MHz) together with an ID. The TPMS available on the market only display the values for the user and are not saved.

In addition, the torus microphone as well as the data acquisition and telemetry of the acoustic signal are attached to the wheel. The communication between the data logger and the data acquisition of the acoustic signal is via Bluetooth due to the high data transfer rate.

The weighted quadratic mean (RMS) of acceleration is used to evaluate the vibration of the vehicle due to road unevenness and obstacles. The current weighted RMS takes account of occasional shocks and transient vibrations, e. g. from potholes. It is expressed in m/s² for translational vibration and rad/s² for rotational vibration. The current weighted RMS of acceleration is calculated from the vertical acceleration and roll acceleration of the vehicle body to capture vibrations due to unevenness and single-track obstacles such as potholes. To reduce the sensitivity of speed to vehicle vibration, statistical data binning is applied and the current weighted RMS of acceleration is grouped into bins with speed intervals.

The speed bins are freely definable. However, a good option might be to define speed bins that represent speed intervals for 30 km/h zones, inner city roads, highways and motorways. A score is determined for each speed bin and for normalized vertical and roll acceleration. The final score, called road unevenness index (RUI), is the maximum of vertical and roll acceleration and ranges from 0 to 1.

The acoustic sensor data in the tire cavity is processed using the same method as described for the inertial sensor. However, they are mainly based on the SPL of tire cavity noise as a feature. Rather, it is a matter of estimating surfaces with different macro textures and thus a road roughness index (RRI) rather than recognizing road obstacles or unevenness. However, the SPL feature is more sensitive to speed and therefore finer speed intervals with 2 m/s steps are used. In addition, the data is filtered by tire temperature, tire pressure and load to take into account only comparable conditions and to avoid data obtained under extreme conditions. For example, when the car is parked, the tire cavity assumes a similar temperature of the surroundings, which can range from -10 degrees Celsius in winter to 40 degrees Celsius in summer. However, several studies in different environmental conditions have shown that the temperature remains approximately constant at 35 to 40 degrees Celsius after 10 minutes of driving. As a result, the start of a ride and longer stops, when the tyre temperature drops again, are filtered out in the same way as the tyre pressure, which roughly follows the tyre temperature curve.

Annotated data enables the detection of specific objects or road surfaces with specific properties. The most important part of processing labelled data is finding characteristics that can separate the desired classes in the feature space. First, the candidates are formed by characteristics based on theoretical and physical considerations or the analysis of data from preliminary investigations known as feature engineering. Another possibility is the use of feature learning techniques to automatically find representations of the raw data for classification. However, the latter is not taken into account in this project. The feature candidates are automatically evaluated using the MANOVA method and the best features for separating the classes are selected to reduce the dimension of the feature vector and avoid over-adjustment. Revised models have a poor generalization with too many parameters compared to the number of observations. Then the model describes random noise rather than the underlying relationship.

It is difficult to illustrate the feature space with higher dimensions. Therefore, it can be further reduced by feature aggregation, for example through discriminant function analysis. This enables to visualize the aggregated characteristic space with, for example, two dimensions and to check whether the classes can be separated. The disadvantage of this method is a decrease in the accuracy of the classification and the difficult interpretation of the aggregated characteristics.

Finally, regression or classification is performed with a Support Vector Machine (SVM). This project distinguishes between the classification of road objects, road condition or individual obstacles such as potholes and the estimation of road roughness within the macrotexture. Object detection is based on the vehicle body vibration measured by the inertial sensor, while road roughness estimation is based on the tire vibration detected by the tire cavity noise sensor. The first data set therefore consists of the vehicle's acceleration and angular speeds in three directions and the second data set consists of the acoustic pressure of the tyre cavity. Both data sets are extended by dependent parameters, such as vehicle speed.

For the feature extraction of inertial sensor data, the following distance series data are taken into account:

- Vertical acceleration,
- Roll rate,
- Pitch rate.

In addition, the rolling and pitch acceleration as well as the jerk of the vehicle is calculated by exploiting the deviation of the vertical acceleration in the time domain. The short-time Fourier transform transforms the distance series data into the frequency domain. This allows properties based on certain frequency bands to be investigated. Therefore, the following data streams are added to the three distance series data, resulting in a total of 7 data streams:

- Roll acceleration,
- Pitch acceleration,
- Vertical acceleration,

- ► Derivation of vertical acceleration,
- ► Short-term Fourier transformed vertical acceleration,
- ► Short-term Fourier transformed pitch acceleration,
- ► Short-term Fourier transformed roll acceleration.

The features are calculated for windows with a certain length in the distance range and a defined overlap. If a greater distance is selected, short amplitudes, e. g. due to potholes, have a weaker influence on the value of features containing the overall signal, such as the standard deviation. These short amplitudes can be measured by shortening the window size or by using characteristics that calculate extremes.

From the data of the distance series we calculate the

- Standard deviation,
- ▶ Peak-to-peak,
- ► Average.

For the briefly transformed Fourier data and the spectral center of gravity, we extract the characteristics

- Average
- Standard deviation
- ► Maximum

for the RMS of the following frequency bands (1/m): [0,1; 0,5] [0,5;15] [15; 20] [0,1; 25] [0,1; 50]

The described data processing method for the inertial sensor data is used analogously for the tire cavity noise data. Road surfaces with different properties, in particular with different grain size distributions, can be classified on the basis of performance markers of different frequency bands.

This work follows the estimation of a road roughness index based on tyre vibration represented by the SPL of tyre cavity noise and applies SVM regression.

The speed has a strong influence on the sound pressure in the tyre cavity and is recorded as a feature of this regression. Tyre pressure, tyre temperature and vehicle load are also taken into account, although the influence is lower than that of speed.

The features are scaled to the range from 0 to 1 and a polynomial core function of order 2 takes into account the non-linear ratio of speed and SPL of the tire cavity noise. Further features can be integrated, such as tyre type, ambient temperature, water or snowfall, etc. The parameters are different for each tire and vehicle.

In total, data with the inertial sensor as well as with the acoustic sensor were collected with various vehicles (Ford Galaxy, Mercedes-Benz S-Class, Smart, VW Golf Variant, VW Golf, BMW 1 Series, Mercedes-Benz C-Class). The collected data cover a distance of >1000 km.

In the project, novel methods for the comprehensive and automatic estimation of road conditions with vehicle-based sensors were developed and applied. In order to collect the data from the sensors, a cost-effective measuring system for fleet use was developed. The installation and operation of the measuring system requires hardly any manual intervention and the data can be automatically transferred to a central database.

A road unevenness index (RUI) is estimated with an inertial sensor in the vehicle body and a road roughness index (RRI) with an acoustic sensor in the tyre cavity. The estimation of the indices is based on the measurement of vehicle and tyre vibrations with the above-mentioned sensors.

Experiments under controlled conditions have shown that the vibrations do not only depend on road roughness or unevenness, but also on environmental influences or the operation of the vehicle, in particular on speed. In order to reduce the effect of these influences, the indices for certain bins are estimated based on the main influences. The comparison with the Ground Truth suggests that the estimators agree with the actual road condition. The estimators of different vehicles can be combined and visualized on maps.

For the inertial and acoustics sensor, supervised learning data processing for the classification of road characteristics and road roughness is introduced. One of the most important innovations is a feature selection with MANOVA to reduce complexity and avoid over-adaptation of the classifier. Two classifiers for inertial sensor data have been developed to estimate road characteristics.

The prediction of the methods was examined and the results indicate a good performance. In general, the inertial sensor and the acoustic sensor are a very good way to collect information about the tyre/road contact in a cost-effective and area-wide way.

The combination of these sensors with a camera could be the optimal solution for a mobile evaluation of the condition of the road infrastructure.

All in all, the project achieved its goals:

- ► further development of an existing prototype to record the tyre interior noise,
- development and application of methods for data evaluation.

The trends of digitisation and automation are not only affecting road condition monitoring. Current road infrastructure assessment practices are cumbersome and costly. The methods developed in this work can improve or partially implement current practice. The data processing methods can be operated on control units of modern vehicles that serve as sensor platforms. Since the system is modular, the number and type of sensors as well as the sensor modality can be varied. But also a fleet of vehicles can be equipped with the presented system.

1 Einleitung und Projektziele²

Die Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm liegt seit vielen Jahren auf gleichbleibend hohem Niveau. Verkehrslärm kann die Gesundheit gefährden und führt zu massiven Belästigungen und Störungen des Schlafs und der Kommunikation. Nach Umfragen des Umweltbundesamtes fühlt sich mehr als die Hälfte der Bundesbürger durch Straßenverkehrslärm belästigt. Die Verminderung der verkehrsbedingten Lärmbelästigung auf gesundheitlich unbedenkliche Werte ist daher ein übergeordnetes Schutzziel der Bundesregierung.

Bei Strategien zur Minderung der Lärmbelastung spielen Maßnahmen an der Quelle wegen ihrer hohen Wirksamkeit und ihres oftmals günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses eine zentrale Rolle. Im Bereich des Straßenverkehrslärms haben die Art der Fahrbahndeckschicht und deren Zustand einen erheblichen Einfluss auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch, das wiederum einen wesentlichen Beitrag zu den Gesamtemissionen des Straßenverkehrs leistet.

Sowohl bei der Lärmprognose im Rahmen der Planfeststellung von Straßenbaumaßnahmen als auch bei der Lärmaktionsplanung nach Umgebungslärmrichtlinie wird von einem einwandfreien Zustand der Straße ausgegangen. Gleichzeitig ist hinlänglich bekannt und wird allseits beklagt, dass der Zustand des Straßennetzes vielerorts schlecht ist. Mit "Zustand" ist in der Regel der bautechnische Zustand gemeint, und die Bedenken betreffen vorrangig die Sicherheit des Verkehrs. Doch dass eine löchrige Straße auch extrem laut ist, versteht sich von selbst. Aber noch bevor die Sicherheit einer Straße z.B. durch Schlaglochbildung beeinträchtigt wird, gehen oft möglicherweise im Neuzustand vorhandene Lärmminderungseigenschaften teilweise oder ganz verloren.

Aus Sicht des Lärmschutzes ist daher die flächendeckende Überwachung des akustischen Zustands des Straßennetzes von Interesse. Während der bautechnische Zustand des Fernstraßennetzes regelmäßig mit Messfahrzeugen überwacht wird, findet bisher keinerlei systematische Erfassung des akustischen Zustands des deutschen Straßennetzes statt. Dies liegt unter anderem daran, dass eine solche Erfassung mit klassischen Verfahren wie dem SPB- oder dem CPX-Verfahren eine messtechnische Herausforderung wäre, für die weder Mittel noch Messtechnik in ausreichendem Maß vorhanden ist. An hat dieses Forschungsvorhaben angesetzt.

Das übergeordnete Ziel des Projekts ist es, die Grundlagen für ein neues Verfahren zur flächenhaften Erfassung des akustischen Zustands des Straßennetzes zu legen und erste Erfahrungen mit dem Verfahren zu sammeln. Der zentrale Unterschied des neuen Verfahrens im Vergleich zu klassischen Verfahren besteht darin, dass anstelle einiger weniger, hochpräziser aber teurer Messsysteme, die eine Bedienung durch Experten erfordern, eine große Anzahl preiswerter, robuster und weitgehend automatisierter Messsysteme von Laien im Verkehr bewegt wird. Für Einzelmessungen sind diese Systeme weniger geeignet, dafür ergeben sich bei ausreichender Redundanz vieler Einzelmessungen über eine geeignete statistische Auswertung wiederum präzise flächendeckende Aussagen zum akustischen Zustand des Straßennetzes, und das zu erschwinglichen Kosten.

Das eben skizzierte übergeordnete Ziel des Projekts bildet die Leitlinie für die beiden im Projekt konkret zu erreichenden Ziele.

Das erste konkrete Ziel betrifft die Messtechnik. Die messtechnische Basis des Projekts bildet die akustische Torusmessmethode, kurz ATM-Methode. Dabei wird mit einem an der Felge des Messfahrzeugs montierten Mikrofon das Reifeninnengeräusch erfasst, aus dem sich Aussagen über die akustisch relevante Fahrbahntextur ableiten lassen. Der Reifeninnengeräuschpegel wird natürlich stark von der Bauart und Größe des Reifens und seinem Profil beeinflusst – der Reifen ist somit integraler Bestandteil des Messsystems.

² Textstellen dieses Kapitels wurden aus der Projektskizze zum Projekt "Überwachung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels ATM-Messungen" vom 16.09.2014 (UFOPLAN 3714 54 1000) übernommen.

Da das Messsystem auf verschiedenen Fahrzeugen über längere Zeiträume weitgehend automatisiert arbeiten soll, ist der am Institut für Fahrzeugsystemtechnik entwickelte Prototyp des Messsystems in Richtung eines zukünftigen Masseneinsatzes weiterzuentwickeln. Dabei ist sicherzustellen, dass das System möglichst wartungsfrei arbeitet.

Das zweite konkrete Ziel betrifft die Datenauswertung. Idealerweise werden die von den verschiedenen Messsystemen gesammelten Daten regelmäßig automatisch auf einen zentralen Server geladen. Damit könnten möglicherweise auftretende technische Probleme an Messsystemen bereits innerhalb eines Wartungszyklus und nicht erst an dessen Ende erkannt werden. Außerdem würde es eine zeitnahe Auswertung der Messdaten erlauben, gegebenenfalls innerhalb des Projekts Korrekturen an der Messstrategie vorzunehmen.

2 Messtechnik

2.1 Konzept

Um Daten unter realen Bedingungen mit mehreren Fahrzeugen umfassend zu erfassen und eine Überwachung der Straßeninfrastruktur in kurzen Zeitabständen zu ermöglichen, muss ein Messsystem die folgenden Anforderungen erfüllen:

- ► automatische Datenerfassung ohne manuelle Eingriffe,
- ▶ automatische Datenübermittlung an eine zentrale Datenbank in kurzen Zeitabständen,
- ▶ niedrige Investitionskosten pro Einheit.

Das entwickelte Gesamtkonzept ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt wird. Die zentrale Komponente ist ein Datenlogger, der selbst programmiert werden kann. An diesen wird ein GPS-System und ein Beschleunigungssensor angeschlossen. Der Inertialsensor wird fest im Fahrzeug verbaut, sodass das Koordinatensystem identisch mit dem fahrzeuggebundenen Koordinatensystem ist. Mit diesem können Inertialsensordaten in x-, y-, und z-Richtung erfasst, und später analysiert werden.

Da Längs- und Querbeschleunigungen am Fahrzeug Einfluss auf das Reifentorusgeräusch haben, können Streckenabschnitte betrachtet werden, bei denen keine Beschleunigungsvorgänge aufgetreten sind. Zusätzlich können diese Abschnitte gezielt mit Fahrsituationen verglichen werden, bei denen Beschleunigungen stattgefunden haben.

Das GPS-System gibt die auf 3 Metern genaue Position des Fahrzeugs, sowie dessen Geschwindigkeit wieder. Letztere Größe ist ebenfalls für die Auswertung des Reifentorusgeräuschs wichtig und wird als Kontrollvariable erfasst und analysiert werden.

Eine weitere Komponente des Gesamtsystems ist das direkte Tire-Pressure-Monitoring-System (TPMS), bzw. Reifendruckkontrollsystem (RDKS). Bei einem direkten TPMS wird ein Sensor an das Reifenventil geschraubt, welcher die Reifeninnenlufttemperatur und den Reifendruck erfasst. Diese Größen, welche ebenfalls das Reifentorusgeräusch beeinflussen, werden zusammen mit einer ID in gewissen Intervallen über Funk (433 MHz) an einen Empfänger übertragen. Die am Markt erhältlichen RDKS zeigen die Werte für den Benutzer nur an und werden nicht gespeichert.

Am Rad wird außerdem das Torusmikrofon, sowie die Datenerfassung und Telemetrie des akustischen Signals angebracht. Die Kommunikation zwischen Datenlogger und Datenerfassung des akustischen Signals wird aufgrund der hohen Datenübertragungsrate Bluetooth erfolgen.



Abbildung 1: Schematische Darstellung des Gesamtkonzepts

Kommunikation nach der Fahrt

Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

2.2 Untersuchung der Sensoren

2.2.1 Inertialsensor

MEMS Sensoren haben eine gute Leistung und haben Vorteile in Größe und Leistung im Vergleich zu anderen Technologien. Um die Bewegung der Fahrzeuge zu messen wird ein MEMS Inertialsensor, LSM9DS1, eingesetzt. Die Leistung des MEMS Inertialsensors wird mit einer dedizierten IMU (OXTS-RT2502 von Oxford Technologies Solutions Ltd.) verglichen.

Abbildung 2 zeigt den Vergleich des Signals des MEMS Inertialsensors und des Referenzsensors, OXTS-RT2502, für verschiedene Manöver, einschließlich Slalom, Beschleunigung und Verzögerung, und einen Leistentest. Die gefilterten Signale werden mit einem Savitzky-Golay-Filter mit den Parametern k=7 und f=21 für die vertikale Beschleunigung und mit k=3 und f=51 für alle anderen Signalen geglättet.

Obwohl der MEMS-Sensor ein größeres Rauschen (0,1921 m/s²) im Vergleich zum Referenzsensor (0,1428 m/s²) aufweist, zeigt Abbildung 2, dass der MEMS-Sensor geeignet ist, die Fahrzeugbewegung mit einer ähnlichen Genauigkeit zu messen wie der dedizierte Datenlogger. Tabelle 1 unterstreicht diese Hypothese mit Performance-Maßen für alle durchgeführten Manövern.





Quelle: Masino J., Frey M., Gauterin F., and Sharma R. Development of a highly accurate and low cost measurement device for Field Opera-tional Tests. In 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, pages 74–77, Feb. 2016

1 abelie 1. Fellollilalice-waise lui Neleleliz ullu willwis illeluaiselisoi

Manöver	R ²	NRMSE in Prozent	
Start- und Bremsvorgang			
Longitudinale Beschl. (ungefiltert)	0,9948	2,0912	
Longitudinale Beschl. (gefiltert)	0,9997	0,5264	
Slalom			
Laterale Beschl. (ungefiltert)	0,9935	2,3513	
Laterale Beschl. (gefiltert)	0,9994	0,8570	
Gierrate (ungefiltert)	0,9997	0,5468	
Gierrate (gefiltert)	1,0000	0,2200	
Leistentest			
Vertikale Beschl. (ungefiltert)	0,8393	4,1021	
Vertikale Beschl. (gefiltert)	0,9302	2,5248	

2.2.2 Akustiksensor

Nach Durchsicht der bestehenden Literatur über die Akustische Torusmessmethode wurde festgestellt, dass noch kein Test mit unterschiedlichen Mikrofontypen durchgeführt wurde. Es wurde zwar die Theorie aufgestellt, dass das Messen des Schalldrucks im Reifentorus nur mit einem hochwertigen piezoelektrischen Druckaufnehmer mit Beschleunigungskompensation möglich ist, jedoch wurde dies durch keine Messung bewiesen. Die Kosten eines solchen hochwertigen Druckaufnehmers liegen bei ca. 3.000 Euro. Nach Rücksprache mit Mikrofonherstellern soll es durchaus möglich sein, mit einem Messelektretmikrofon das Reifentorusgeräusch sauber messen zu können, trotz der Zentrifugalkraft, welche während dem Fahrzeugbetrieb auf die Mikrofonmembran wirkt. Aufgrund dieser Aussage und den hohen Kosten eines hochwertigen piezoelektrischen Druckaufnehmers werden Mikrofone unterschiedlicher Art getestet. In die Auswahl des Tests wurden folgende Mikrofone aufgenommen:

- PCB-103B02 (Piezoelektrischer Druckaufnehmer)
- PCB-130B40 (Oberflächenelektretmikrofon)
- MI15 (Messelektretmikrofon)
- ► CMA-4544PF-W (Elektretmikrofonkapsel)

Um die Eignung der ausgewählten Mikrofone zur Messung des Schalldruckpegels im Reifenhohlraum festzustellen, wurden die Mikrofone in mehreren experimentellen Versuchen miteinander verglichen. Dabei wurde eine Bewertung der Mikrofone vorgenommen und eine Empfehlung für ein Mikrofon für den künftigen Flotteneinsatz abgegeben.

Zunächst wurden die Mikrofone im Freifeld unter Luftschall-Anregung gemessen und mit dem Referenzmikrofon verglichen um ihre Eignung bezüglich des Frequenzgangs zu untersuchen. Es folgten Versuche am ruhenden Reifen mit dem Impulshammer, welche die Eigenschaften der Mikrofone unter hohem Druck im Reifenhohlraum überprüfen. Abschließend wurde ihre Leistungsfähigkeit beim Einsatz im fahrenden Automobil getestet, was den späteren Realbedingungen bei der akustischen Untersuchung von Fahrbahnbelägen entspricht.

Die fünf für die experimentelle Untersuchung ausgewählten Mikrofone und das Referenzmikrofon werden im Folgenden kurz vorgestellt.

2.2.2.1 Mikrofone für die experimentelle Untersuchung

PCB 103B02 (Referenz)

Das PCB 103B02 ist ein akustischer Drucksensor der PCB Piezotronics, Inc. Dieses piezoelektrische Mikrofon verfügt über eine omnidirektionale Richtcharakteristik und ist beschleunigungskompensiert. Zudem ist es laut Herstellerangaben in der Lage, Schalldruckpegel von bis zu 186,3 dB unter hohem Luftdruck von bis zu 17,2 bar zu messen. Da es zudem bereits von Krauss erfolgreich für Messungen im Reifenhohlraum eingesetzt wurde, dient es für die experimentellen Untersuchungen als Referenz. Aufgrund der hohen Kosten von 2.500 Euro kommt es jedoch nicht für den geplanten Flotteneinsatz in Frage. Nachfolgend wird das PCB 103B02 als "PCB" bezeichnet.

Sigmatest MI 15

Das MI 15 ist ein Elektret-Kondensatormikrofon der Firma Sigmatest Messtechnik. Aufgrund des sehr linearen Frequenzgangs, der für Elektret-Kondensatormikrofone hohen maximal messbaren Schalldruckpegel von bis zu 140 dB (Herstellerangabe) und der Abmessungen (Durchmesser: 7 mm, Höhe: 45 mm) wurde es für die Experimente ausgewählt. Es ist mit 220 Euro zwar deutlich teurer als die anderen vorausgewählten Mikrofone, liegt jedoch im finanziellen Rahmen für den angestrebten Flotteneinsatz.

CEM-C9745JAD462P2.54R

Als kostengünstige Alternative (7,40 Euro) wurde das Elektret-Kondensatormikrofon CEMC9745JAD462P2.54R der Firma Challenge Electronics in Kombination mit dem Operationsverstärker OPA344 von Texas Instruments Incorporated als Komplettpaket mit dem Namen "SparkFun Electret Microphone Breakout" untersucht. Der Durchmesser beträgt 9,7 mm, die Höhe 4,5 mm und das Gewicht 0,7 g. Das Mikrofon wird im Gegensatz zum MI 15 oder dem PCB nicht mit einer IEPE Konstantstromquelle, sondern mit einer 4,5 V Konstantspannungsquelle betrieben. Aufgrund seiner langen Bezeichnung wird das CEM-C9745JAD462P2.54R im weiteren Verlauf des Berichts als "Sparkfun" bezeichnet.

INMP411

Das INMP411 ist ein MEMS-Mikrofon der Firma InvenSense Inc. in kapazitiver Bauweise. Es wurde aufgrund seiner geringen Kosten von 4,25 Euro und des hohen "Acoustical Overload Point" (AOP) von 131 dB sowie des maximalen Schalldruckpegels von 160 dB, welchen das Mikrofon ohne Beschädigung übersteht (Herstellerangaben), ausgewählt. Beim AOP handelt es sich um den maximal messbaren Schalldruckpegel. Dank seinen sehr kompakten Abmessungen von ca. 5 x 4 mm und einer Höhe von nur 1 mm, eignet es sich ideal für den Einsatz im Reifenhohlraum. Die Membran ist aufgrund ihrer geringen Masse zudem sehr widerstandsfähig gegen Beschleunigungen und Vibrationen. Das INMP411 muss von einer externen Spannungsquelle (1,5 V - 3,63 V) gespeist werden.

CMA-4544PF-W

Beim CMA-4544PF-W handelt es sich um eine äußerst kostengünstige (0,87 Euro) Elektret-Kondensatormikrofonkapsel der Firma CUI Inc. Aufgrund der kompakten Abmessungen (Durchmesser: 9,7 mm, Höhe: 4,5 mm) und des geringen Gewichts von 0,8 g ist sie für den Einsatz im Reifenhohlraum sehr gut geeignet. Im Gegensatz zu den anderen ausgewählten Mikrofonen besitzt das CMA-4544PF-W keinen eingebauten Mikrofonverstärker. Daher wurde dieser in Eigenarbeit angefertigt. Der Schaltplan ist in Abbildung 3 dargestellt. Es handelt sich dabei um einen standardmäßigen Mikrofonverstärker.

Abbildung 3: Anordnung der Mikrofonpole und Schaltplan eines üblichen Mikrofonverstärkers.



Quelle: Masino J., Daubner B., Frey M., and Gauterin F. Development of a tire cavity sound measurement system for the application of field operational tests. In 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon), pages 1–5, Apr. 2016

Den Herstellerangaben zu Folge ist das Mikrofon unter Einsatz dieser standardmäßigen Mikrofonverstärkerschaltung in der Lage, Schalldruckpegel von bis zu 105 dB (THD < 1%) und 121 dB (THD < 10%) zu messen. Die dabei vorhandenen harmonischen Verzerrungen sind jedoch zu einem Großteil auf das Verhalten der Verstärkerschaltung zurückzuführen. Insbesondere die in günstigen Elektret-Kondensatormikrofonkapseln üblicherweise eingesetzten Feldeffekt-Transistoren neigen zu starkem Eigenrauschen und zur Erzeugung von harmonischen Verzerrungen bei hohen Schalldruckpegeln. Um dem Mikrofon zu ermöglichen, höhere Pegel als 121 dB mit dennoch geringen harmonischen Verzerrungen zu messen, wurde daher die sogenannte und nachfolgend beschriebene Linkwitz-Modifikation angewandt. In den experimentellen Untersuchungen wird ein Mikrofon des Typs CMA-4544PF-W mit Standard-Mikrofonverstärkerschaltung (im Folgenden als "CMA-S" bezeichnet) zum Einsatz kommen und ein Mikrofon desselben Typs mit Linkwitz-Modifikation (im Folgenden als "CMA-M" bezeichnet).

CMA-4544PF-M und Linkwitz-Modifikation

Die Linkwitz-Modifikation, benannt nach Siegfried Linkwitz, ist eine spezielle Schaltung für Mikrofonverstärker, die in Source-Follower Konfiguration arbeitet. Durch die dabei eingesetzte Gegenkopplung sinkt die am internen Feldeffekt-Transistor abfallende Spannung und damit dessen Verstärkungsfaktor, wodurch die Empfindlichkeit des Mikrofons im Gesamten und damit dessen Ausgabespannung sinkt. Dadurch wird der Feldeffekt-Transistor bis hin zu sehr hohen Schalldruckpegeln im linearen Bereich betrieben und erzeugt somit deutlich geringere Verzerrungen. Das Mikrofon kann daher höhere akustische Signalpegel verarbeiten und erzeugt zugleich deutlich geringere Verzerrungen. Um das CMA-4544PF-W mit der Linkwitz-Modifikation zu betreiben, müssen die Pole der Kapsel entsprechend getrennt bzw. neu verbunden werden. Abbildung 4.2 zeigt die für die Anwendung der Linkwitz-Modifikation auf das CMA-4544PF-W notwendige Konfiguration der Anschlüsse und die neue Schaltung.

Abbildung 4: Anordnung der neu konfigurierten Mikrofonpole und Schaltplan des Linkwitz-Mikrofonverstärkers.



Quelle: Masino J., Daubner B., Frey M., and Gauterin F. Development of a tire cavity sound measurement system for the application of field operational tests. In 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon), pages 1–5, Apr. 2016

Bei der Linkwitz-Modifikation kommt, um den schwächeren Verstärkungsfaktor auszugleichen und hohe Schalldruckpegel messen zu können, zudem eine andere Gleichspannungsquelle (9 V statt 1,5 V) zur Versorgung der Verstärkerschaltung zum Einsatz. Diese erhöht die maximal darstellbaren Pegelreserven des Mikrofons deutlich, da sie größere Ausgabespannungen ermöglicht. Die den maximal messbaren Schalldruck limitierende Komponente ist aufgrund dieser speziellen Schaltung nicht mehr der interne Feldeffekt-Transistor, sondern die physische Robustheit der Membran sowie deren elektrisches Verhalten gemeinsam mit der sich dahinter befindlichen gelochten Metallplatte. Das modifizierte Mikrofon wird im Folgenden CMA-4544PF-M bzw. CMA-M bezeichnet. Die Kalibrierung mit dem Brüel & Kjaer Typ 4231 Mikrofon-Kalibrator bei 94 dB (1 Pa) ergibt eine Empfindlichkeit von 1,9 mV/Pa für das CMA-M. Aus diesem Wert lässt sich mit Hilfe der Versorgungsspannung von 9 V der theoretisch maximal messbare Pegel von 9 V / 1,9 mV/Pa = 4.737 Pa (167,5 dB) berechnen. Aufgrund von Verlusten in der Verstärkerschaltung wird diese Ausgabespannung jedoch nicht erreicht.

2.2.2.2 Kalibrierung der Mikrofone

Da die korrekte Auswertung des Schalldruckpegels für die Auswahl der Mikrofone eine große Bedeutung besitzt, wurden sie mit Hilfe des Brüel & Kjaer Typ 4231 Mikrofon-Kalibrators bei 94 dB (1 Pa) kalibriert. Die Kalibrierung erfolgte, indem die Messung des Kalibrier-Signals jeweils mit der vom Hersteller angegebenen Empfindlichkeit durchgeführt wurde. Anschließend wurde die Abweichung des gemessenen Schalldruckpegels von den 94 dB, welche der Kalibrator zur Verfügung stellt, berechnet und die Empfindlichkeit des Mikrofons entsprechend angepasst. Tabelle 2 zeigt die Herstellerangaben sowie die mit dem Kalibrator ermittelten Empfindlichkeiten der Mikrofone.

Mikrofon	Gemessene Emp- findlichkeit (mV/Pa)	Herstellerangabe Empfindlichkeit (mV/Pa)
PCB	0,21	0,22
MI 15	35,5	50,0
Sparkfun	5,4	5,0
INMP411	4,6	5,0
CMA-S	4,5	6,3
CMA-M	1,9	6,3*

Tabelle 2: Vergleich von ermittelter Empfindlichkeit mit den Herstellerangaben.

*Die Angabe gilt für das CMA-4544PF-W mit Standard-Mikrofonverstärkerschaltung

2.2.2.3 Experimentelle Untersuchung der Mikrofone

In Abbildung 5 sind die Messfelge und Mikrofone für die experimentellen Untersuchungen dargestellt.



Abbildung 5: Messfelge und Mikrofone

- a): Anbringung der Mikrofone an der Felge
- b): Messelektretmikrofon im Gehäuse an der Felge
- c): Oberflächenmikrofon auf der Felge verklebt
- d): Piezoelektrischer Druckaufnehmer im Gehäuse an der Felge
- e): v.l.r.: Messelektretmikrofon, Elektretmikrofonkapsel mit Verstärker, Piezoelektrischer Druckaufnehmer

Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

Harmonische Verzerrung der Mikrofone bei 110 dB

Um die von den Mikrofonen erzeugten harmonischen Verzerrungen bei hohen Schalldruckpegeln zu überprüfen, wurden diese mit Hilfe eines Kopfhörers mit einem 1 kHz-Sinuston angeregt. Dieser Sinuston wurde mit einem Schalldruckpegel von 110 dB generiert, um einerseits hohe Pegel für die Mikrofone bereit zu stellen, aber dabei dennoch die harmonischen Verzerrungen des Kopfhörers zu minimieren. Der Kopfhörer wurde auf das Mikrofon gelegt, sodass er einen geschlossenen Hohlraum bereitstellte, in dem das Mikrofon positioniert wurde. Für die Auswertung der harmonischen Verzerrungen (engl.: Total Harmonic Distortion (THD)) wurden jeweils 10 s des Schalldruckpegels untersucht. Die Resultate der Analyse sind in Tabelle 3 zu finden.

Mikrofon	THD (dB)	THD (%)
PCB	-65,9	0,05
MI 15	-74,3	0,02
Sparkfun	-39,2	1,1
INMP411	-50,7	0,29
CMA-S	-37,0	1,41
CMA-M	-63,4	0,07

Tabelle 3: Vergleich der analysierten THD-Werte der Mikrofone bei 110 dB, 1 kHz.

Das MI 15 weist mit 0,02% bzw. -74,3 dB die geringsten harmonischen Verzerrungen auf. Danach folgt das PCB mit 0,05% bzw. -65,9 dB. Der THD-Wert des CMA-M fällt mit 0,07% bzw. -63,7 dB ebenfalls sehr niedrig aus. Für beide Mikrofone liegen keine Herstellerangaben zum Vergleich vor. Beim CMA-S entspricht die gemessene THD dem aufgrund der Herstellerangabe (1% THD bei 105 dB) erwarteten Wert von 1,41% bzw. -37,0 dB. Die Linkwitz-Modifikation ist nach diesen Resultaten in der Lage, die harmonischen Verzerrungen bei 110 dB, 1 kHz um 26,7 dB zu senken. Damit können mit dem CMA-M auch bei hohen Schalldruckpegeln Messungen mit höchster Qualität und geringer Einflussnahme durch Verzerrungen durchgeführt werden.

Auch beim INMP411 stimmt der gemessene THD-Wert von 0,29% mit der extrapolierten Herstellerangabe von 0,2% für 105 dB überein. Das Sparkfun erzeugt einen THD-Wert von 1,1% bzw. -39,2 dB und stimmt damit ebenfalls sehr gut mit der Hersteller-Angabe von 1,0% bei 110 dB, 1 kHz, überein. Abbildung 6 zeigt die THD des INMP411 bei Anregung mit einem 1 kHz Sinuston mit 110 dB.





Quelle: Daubner, B. Auswahl eines Sensors für das Akustische Torusmessgerät mittels Durchführung von Experimenten Und Bewertung der Ergebnisse. Final Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Vehicle System Technology, 2015.

Freifeldmessung

Mit Hilfe der Messung der Mikrofone im Freifeld wurde deren grundlegende Fähigkeit zur exakten Erfassung der vorliegenden Schwankungen im Schalldruck überprüft. Dieses Experiment hatte zudem das Ziel, die Mikrofone unter definierten und kontrollierten Bedingungen miteinander zu vergleichen. Messungen im Freifeld finden im Idealfall immer unter denselben Bedingungen statt. So wird jeglicher Einfluss des umgebenden Raumes auf die Messung vermieden. Es ist daher insbesondere darauf zu achten, dass sich sowohl das Mikrofon als auch der anregende Lautsprecher weit von den Raumbegrenzungsflächen entfernt befinden. Der anregende Lautsprecher verfügt im theoretischen Idealfall über einen absolut linearen Frequenzgang, gibt also bei jeder Frequenz denselben Schalldruckpegel aus. Dieser Idealfall wird in der Praxis nicht erreicht. Dennoch kann mit Hilfe der Freifeldmessung ein Vergleich zwischen den Mikrofonen durchgeführt werden. Die ausgewählten Mikrofone werden dabei mit dem Referenzmikrofon PCB verglichen.

Die Mikrofone wurden in einem Abstand von 50 cm vor dem Lautsprecher positioniert, um die Einflüsse der Raumakustik zu minimieren. Der Lautsprecher wurde zudem auf einem Stativ mit 65 cm Höhe angebracht, da somit die Schallreflexionen am Boden, welche sich auf das Messresultat auswirken, verringert werden konnten. Da der Lautsprecher über einen Hochtöner sowie einen Tief-Mitteltöner verfügt, wurden die Mikrofone in der Höhe genau zwischen diesen beiden Chassis positioniert. An dieser Position ist der zu messende Frequenzgang des Lautsprechers am linearsten. Um sowohl das Grundrauschen der Mikrofone, als auch die minimalen Umgebungsgeräusche zu übertreffen, wurde die Messung mit einem Schalldruckpegel von 100 dB durchgeführt.

Der Frequenzgang aller sechs Mikrofone ist in Abbildung 7 dargestellt. Im Frequenzbereich von 50 Hz bis 500 Hz lassen sich Einflüsse der Raumakustik nicht vollständig ausschalten und sind daher im Frequenzgang der Mikrofone sichtbar. Insbesondere die Überhöhung bei 60 Hz, welche von allen Mikrofonen dargestellt wird, ist auf eine Raummode im Messraum zurückzuführen. Weitere Überhöhungen oder Auslöschungen im genannten Frequenzbereich haben ihre Ursache ebenfalls in Raummoden oder Interferenzen mit der Umgebung. Dennoch lassen sich die Frequenzgänge im Vergleich miteinander auswerten. Tabelle 4 zeigt die Korrelation und das Bestimmtheitsmaß der ausgewählten Mikrofone mit dem Referenzmikrofon im Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 5.000 Hz. Bis auf den Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 200 Hz stimmen die Frequenzgänge der zu testenden Mikrofone sehr gut mit dem des Referenzmikrofons überein. Die maximalen Abweichungen liegen nahezu durchgehend unter 3 dB. Somit können die Mikrofone im weiteren Verlauf der Experimente als geeignet angesehen werden. Selbst die größeren Unterschiede unterhalb von 200 Hz werden bei höheren Schalldruckpegeln keine Rolle mehr spielen, da sie auf das Grundrauschen des PCB zurückzuführen sind und nicht auf mangelhafte Messwerte der Mikrofone. Der PCB-Sensor ist für Messungen mit sehr hohen Schalldruckpegel gedacht und weist ein hohes Rauschen auf. Bei der Freifeld-Messung selbst konnte nur ein Schalldruckpegel von 100 dB erzeugt werden, welcher zu den Abweichungen des Referenzmikrofons im niederfrequenten Bereich führt.

Mikrofon	Korrelationskoeffizient	Bestimmtheitsmaß
MI 15	0,941	0,886
Sparkfun	0,915	0,836
INMP411	0,800	0,640
CMA-S	0,904	0,818
CMA-M	0,904	0,818

Tabelle 4: Korrelation der Mikrofone mit dem Referenzmikrofon zwischen 200 Hz und 5.000 Hz bei 1/12 Oktavband-Glättung des Frequenzgangs.



Abbildung 7: Vergleich der Frequenzgänge aller sechs Mikrofone im Freifeld.

Quelle: Daubner, B. Auswahl eines Sensors für das Akustische Torusmessgerät mittels Durchführung von Experimenten Und Bewertung der Ergebnisse. Final Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Vehicle System Technology, 2015.

Messung im ruhenden Reifen mit Anregung durch einen Impulshammer

Die im Reifenhohlraum montierten Mikrofone müssen in späteren Testfahrten exakte Auswertungen verschiedener akustischer Parameter gewährleisten. Daher werden die Mikrofone in diesem Versuch im aufgepumpten Reifen auf die Qualität der von ihnen gelieferten Resultate im ruhenden Reifenzustand überprüft. Dabei sind das PCB, MI 15 und Sparkfun an einer Felge und ein identisches PCB, INMP411, CMA-S und CMA-M an einer baugleichen zweiten Felge montiert. Ruhend bedeutet in diesem Fall ohne Radlast, Beschleunigung oder Vibrationen. Hierbei wird insbesondere die Fähigkeit der Mikrofone untersucht, unter hohem Druck (2,5 bar über Umgebungsluftdruck) und bei hohen Schalldruckpegeln von bis zu ca. 150 dB exakte Resultate zu liefern. Um das Verhalten der Mikrofone im Reifen untersuchen zu können, wurde die Anregung mittels Impulshammer gewählt, da dieser den Reifen über den auszuwertenden Frequenzbereich von 50 Hz - 5.000 Hz gleichmäßig anregt. Zudem können mit dem Impulshammer die geforderten hohen Schalldruckpegel im Reifeninnern erzeugt werden. Dem Verlauf des Schalldruckpegels (siehe Abbildung 8) lassen sich die Stärke des Grundrauschens sowie der maximal erfassbare Schalldruckpegel der Mikrofone entnehmen. Zudem kann das Ausschwingverhalten nach dem Impuls bewertet werden.

Die Stärke des Grundrauschens entspricht dem durchschnittlichen Schalldruckpegel vor und nach dem Impuls. Um die maximal erfassbaren Schalldruckpegel der Mikrofone bestimmen zu können, wurde der Reifen durch den Impulshammer mit einem größtmöglichen Schalldruckpegel von 146 dB angeregt. Tabelle 5 zeigt die maximal messbaren Schalldruckpegel der Mikrofone. Sowohl beim PCB als auch beim CMA-M liegt der maximal erfassbare Schalldruckpegel deutlich über den mit dem Impulshammer erzeugbaren 146 dB. Daher wurde der maximal messbare Schalldruckpegel des CMA-M im Fahrversuch ermittelt, während der des PCB in keinem der Versuche erzeugt werden konnte (siehe Abschnitt "Messung im Reifen am fahrenden Automobil").

Mikrofon	max. input SPL
PCB	>162 dB
MI 15	142 dB
Sparkfun	133 dB
INMP411	132 dB
CMA-S	140 dB
CMA-M	161 dB

Tabelle 5. Vergielch der maximal messbaren Schalldruckpegel der Mikrolo	Tabelle 5	5: Vergleich de	r maximal	messbaren	Schalldruckpege	el der	Mikrofon
---	-----------	-----------------	-----------	-----------	-----------------	--------	----------

In Abbildung 8 sind die Charakteristika der verschiedenen Mikrofone zu erkennen. Zum Beispiel misst das PCB, welches vor allem für hohe Schalldruckpegel ausgelegt ist, fälschlicherweise einen Ruhepegel von ca. 100 dB. Die gemessenen Ruhepegel für alle anderen Mikrofone liegen zwischen 60 und 80 dB. Das modifizierte CMA (CMA-M) kann einen höheren Schalldruckpegel im Vergleich zum Standard CMA (CMA-S) erfassen. Das MI 15 und INMP411 sind sehr empfindlich und benötigen lange Zeit, bis sie wieder in Ruhelage sind und den Ruhepegel messen.

Der Reifenhohlraum kann nur mit deutlichen Einschränkungen als Hallraum bezeichnet werden. Insbesondere im Frequenzgang zeigen sich deutliche Abweichungen, welche auf unterschiedliche Anregungspositionen bezogen auf die Position des Mikrofons zurückgeführt werden können. Dennoch genügt für die akustische Vermessung von Fahrbahnbelägen der Einsatz eines Mikrofons, da die wichtigsten Parameter ohne Einschränkungen dargestellt werden.

Vier der sechs getesteten Mikrofone sind unter einem Druck von 2,5 bar über atmosphärischem Druck in der Lage, die grundlegenden Parameter für die akustische Untersuchung von Fahrbahnbelägen zu messen. Selbst bei einem Schalldruckpegel von 146 dB stellen sie sowohl den Frequenzgang, als auch das Spektrogramm korrekt dar. Die besten Resultate erzielen dabei das PCB und das CMA-M, welche die akustischen Gegebenheiten im Reifenhohlraum ohne jede Einschränkung darstellen können. Das MI 15 folgt kurz dahinter und weist lediglich bei der Darstellung der ersten Torusmode Unterschiede zu den beiden am besten geeigneten Mikrofonen auf. Die Resultate des CMA-S sind bereits leicht durch die entstehenden harmonischen Verzerrungen beeinträchtigt und entsprechen daher nicht mehr exakt der Realität. Sowohl das INMP411, als auch das Sparkfun erfüllen die genannten Kriterien teilweise nicht. Beide Mikrofone können die hohen Schalldruckpegel nicht messen (siehe Tabelle 5).

PCB 103B02 MI 15 Zeit (s) Zeit (s) (a) Schalldruckpegel des PCB103B02. (b) Schalldruckpegel des MI15. Sparkfun INMP411 Schalldruckpegel (dB) Schalldruckpegel (dB) 0 0 0 0 01 0 0 0 01 Zeit (s) Zeit (s) (c) Schalldruckpegel des Sparkfun. (d) Schalldruckpegel des INMP411. CMA-4544pf-w std. CMA-4544pf-w mod. Schalldruckpegel (dB) 0 0 0 01 0 0 02 Schalldruckpegel (dB) 0 0 0 01 0 0 0 Zeit (s) Zeit (s) (e) Schalldruckpegel des CMA-S. (f) Schalldruckpegel des CMA-M.

Abbildung 8: Vergleich der gemessenen Schalldruckpegel bei Impulshammeranregung aller sechs Mikrofone über der Zeit.

Quelle: Daubner, B. Auswahl eines Sensors für das Akustische Torusmessgerät mittels Durchführung von Experimenten Und Bewertung der Ergebnisse. Final Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Vehicle System Technology, 2015.
Messung im Reifen am fahrenden Automobil

Die Hauptaufgabe der Mikrofone wird die akustische Bewertung von unterschiedlichen Fahrbahnbelägen sein. Aus diesem Grund wurden die Messreifen an einem Testfahrzeug (Mercedes Benz E-Klasse W210) angebracht. Analog zu den Messungen im ruhenden Reifen wurden das PCB, MI 15 und Sparkfun an einer Felge und ein identisches PCB, INMP411, CMA-S und CMA-M an einer baugleichen zweiten Felge montiert. Damit werden die akustischen Signale des Fahrbahnbelags beim Überfahren von Asphalt und Kopfsteinpflaster miteinander verglichen. Dieser Vergleich ermöglicht die Bewertung der Mikrofone unter realen Bedingungen. Zusätzlich zum hohen Luftdruck (2,5 bar über atmosphärischem Druck) müssen die Mikrofone auch den hohen Zentrifugalbeschleunigungen im Reifen sowie den Vibrationen standhalten und dabei aussagekräftige Messwerte liefern. Als Referenzmikrofon dient auch hier das PCB, da solche Versuche mit diesem Mikrofon bereits erfolgreich von Krauss durchgeführt wurden.

Um den Schalldruckpegel der beiden Fahrbahnen miteinander vergleichen zu können, wurden die Messwerte der beiden Beläge im selben Diagramm (siehe Abbildung 9) ausgegeben. Dafür wurden die Daten des PCB genutzt. Tabelle 6 zeigt die durchschnittlichen und maximalen Schalldruckpegel, welche das PCB auf beiden Belägen gemessen hat. Die maximalen Werte von 156,7 dB für die erste Messfelge bzw. 159,2 dB für die zweite Messfelge liegen im Bereich der von Bschorr (Bschorr, 1999) und Krauss (Krauss & Gauterin, 2012) gemessenen Werte. Diese Werte liegen deutlich über den maximal erfassbaren Schalldruckpegeln der drei Elektret-Kondensatormikrofone MI 15 (142 dB), Sparkfun (133 dB) und CMA-S (140 dB) sowie dem des Kondensatormikrofons INMP411 (132 dB).

Abbildung 9: Vergleich der geglätteten Schalldruckpegel des PCB von Kopfsteinpflaster und Asphalt.



Quelle: Daubner, B. Auswahl eines Sensors für das Akustische Torusmessgerät mittels Durchführung von Experimenten Und Bewertung der Ergebnisse. Final Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Vehicle System Technology, 2015.

Mikrofon	Durchschnitt SPL Asphalt (dB)	Max. SPL Asphalt (dB)	Durchschnitt SPL Kopfsteinpflaster (dB)	Max. SPL Kopf- steinpflaster (dB)
1. Felge				
РСВ	128,6	149,7	139,1	156,7
MI 15	128,9	142,1	133,1	142,1
Sparkfun	124,0	133,2	126,0	133,2
2. Felge				
РСВ	128,2	150,9	148,5	159,2
INMP411	120,0	132,1	123,8	132,2
CMA-S	120,9	139,6	125,6	140,2
CMA-M	128,0	150,4	137,1	157,6

Tabelle 6: Vergleich der gemessenen durchschnittlichen und maximalen Schalldruckpegel (SPL) aller Mikrofone auf den beiden Fahrbahnbelägen.

Der Frequenzgang der Mikrofone zeigt die frequenzabhängige Sensitivität gegenüber Änderungen im Schalldruck auf und sollte sich durch die im Reifen vorhandenen Beschleunigungen und Vibrationen nur geringfügig beeinflussen lassen. Beim Referenzmikrofon, dem PCB, handelt es sich um ein beschleunigungskompensiertes Mikrofon, sodass die Resultate der anderen fünf Mikrofone, sofern sie mit denen des PCB übereinstimmen, als korrekt angesehen werden. Der Vergleich erfolgt anhand des Frequenzgangs mit 1/12 Oktavband-Glättung, da der ungeglättete Frequenzgang zu volatil ist. Zudem wurden der Korrelationskoeffizient sowie das Bestimmtheitsmaß der Frequenzgänge aller Mikrofone mit dem Referenzmikrofon im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 2.000 Hz verglichen (Abbildung 10). Tabelle 7 zeigt die statistische Auswertung der Korrelation. Im Vergleich zum PCB liefert das CMA-M mit einem sehr hohen Bestimmtheitsmaß die besten Ergebnisse. Als wichtigstes Diagramm bei der Unterscheidung von Straßenbelägen werden auch die Spektrogramme der beiden Mikrofone in Abbildung 11 verglichen. Beide Mikrofone sind in der Lage, die hohen auftretenden Schalldruckpegel von bis zu 161 dB vollständig zu messen. Das zeigt sich deutlich in den nahezu identisch eingefärbten Spektrogrammen.





Quelle: Masino J., Daubner B., Frey M., and Gauterin F. Development of a tire cavity sound measurement system for the application of field operational tests. In 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon), pages 1–5, Apr. 2016

Mikrofon	Korrelations- koeffizient	Bestimmtheitsmaß	Korrelations- koeffizient	Bestimmtheitsmaß
MI 15	0,980	0,939	0,960	0,881
Sparkfun	0,940	0,923	0,883	0,852
INMP411	0,966	0,945	0,933	0,894
CMA-S	0,972	0,967	0,944	0,935
CMA-M	0,978	0,985	0,957	0,971

Tabelle 7: Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmaß zwischen den Frequenzgängen der Mikrofone und dem Referenzmikrofon.

Abbildung 11: Vergleich der gemessenen Spektrogramme des PCB und des CMA-M



(a) Spektrogramm des PCB bei Fahrt mit 60 km/h auf 5 Sek. Kopfsteinpflaster und 5 Sek. Asphalt.



(b) Spektrogramm des CMA-M bei Fahrt mit 60 km/h auf 5 Sek. Kopfsteinpflaster und 5 Sek. Asphalt.

Quelle: Daubner, B. Auswahl eines Sensors für das Akustische Torusmessgerät mittels Durchführung von Experimenten Und Bewertung der Ergebnisse. Final Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Vehicle System Technology, 2015.

2.2.2.4 Fazit des Experiments

Die vorausgewählten Mikrofone wurden zunächst auf ihren Klirrfaktor hin überprüft. Hohe THD-Werte stören die Auswertungen erheblich, da sie die Unterschiede zwischen Fahrbahnbelägen verringern und somit deren Identifikation erschweren. Bei diesem Experiment können sich insbesondere das PCB sowie das MI 15 und das CMA-M mit THD-Werten von weniger als 0,1 % bei 110 dB, 1 kHz auszeichnen. Die drei weiteren Mikrofone befinden sich zwar innerhalb ihrer Spezifikation, weisen dabei jedoch bereits deutlich höhere THD-Werte auf.

Der Freifeld-Frequenzgang wurde experimentell untersucht, um die Eignung der Mikrofone bezüglich ihrer frequenzabhängigen Empfindlichkeit zu prüfen. Dabei weisen alle sechs getesteten Mikrofone einen geeigneten Frequenzgang mit maximalen Abweichungen von 3 dB vom PCB im Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 5.000 Hz auf. Unterhalb von 200 Hz ist das Referenzmikrofon das einzige Mikrofon, welches wesentlich von den Frequenzgängen der anderen Mikrofone abweicht. Dieses Verhalten ist auf sein hohes Grundrauschen und die bei der Messung im Vergleich dazu niedrigen Schalldruckpegel von 100 dB zurückzuführen.

Beim Versuch mit den im aufgepumpten Reifen montierten Mikrofonen und der Anregung durch den Impulshammer konnten der maximal erfassbare Schalldruckpegel sowie das Verhalten der Mikrofone unter hohem statischen Druck von 2,5 bar über Umgebungsluftdruck ermittelt werden. Der maximal erfassbare Schalldruckpegel hat sich als die entscheidende Kennzahl, bezogen auf die Qualität der akustischen Messung des Fahrbahnbelags, erwiesen. Die Anregung durch den Impulshammer konnte jedoch nicht so stark erfolgen, wie es zur Messung des maximal erfassbaren Schalldruckpegels des PCB und des CMA-M notwendig gewesen wäre. Aufgrund dessen konnten das PCB sowie das CMA-M in diesem Experiment die qualitativ hochwertigsten Resultate mit der geringsten Einflussnahme durch den Luftdruck und die hohen vorherrschenden Schalldruckpegel liefern.

Das finale Experiment entspricht exakt den Bedingungen des späteren Flotteneinsatzes. So wurde überprüft, wie gut die Mikrofone in der Lage sind, verschiedene Fahrbahnbeläge, in diesem Fall Kopfsteinpflaster und Asphalt, zu differenzieren. Dies gelingt sowohl dem PCB, als auch dem CMA-M hervorragend, wobei das CMA-M aufgrund seines niedrigeren Grundrauschens minimale Vorteile bei der Identifikation von Fahrbahnbelägen aufweist. Das MI 15 und das CMA-S unterscheiden die beiden Beläge zwar ebenfalls sehr deutlich, können jedoch nicht mehr jedes Detail erfassen, da beide über einen zu niedrigen maximal erfassbaren Schalldruckpegel verfügen. Sowohl das Sparkfun als auch das INMP411 weisen bei den vorherrschenden Schalldruckpegeln starke harmonische Verzerrungen auf und können aufgrund ihres geringen maximal erfassbaren Schalldruckpegels große Teile der vorhandenen Signale nicht mehr erfassen.

Die auf die Mikrofone im sich drehenden Reifen wirkende Zentrifugalkraft zeigt keinen Einfluss auf die akustischen Diagramme, kann jedoch mit Hilfe der Ausgabespannungen nachgewiesen werden. Dort verursacht sie eine statische Auslenkung der Membran und somit einen Offset in der Ausgabespannung.

Tabelle 8 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung. Es wird deutlich, dass das CMA-M eine sehr gute und günstige Alternative zum PCB-Sensor ist und wurde somit als Sensor für den Flottenversuch ausgewählt. Damit konnten die Kosten somit von ca. 2.500 Euro auf wenige Euros reduziert werden, ohne die Qualität signifikant zu verringern.

Mikrofon	Gemessene Empfindlichkeit (mV/Pa)	THD (%)	max. input SPL (dB)	Bestimmtheitsmaß auf Kopfsteinpflas- ter	Bestimmtheitsmaß auf Asphalt
PCB	0,21	0,05	> 162	-	-
MI 15	35,5	0,02	142	0,939	0,881
Sparkfun	5,4	1,1	133	0,923	0,852
INMP411	4,6	0,29	132	0,945	0,894
CMA-S	4,5	1,41	140	0,967	0,935
CMA-M	1,9	0,07	161	0,985	0,971

Tabelle 8: Zusammenfass	ung der Fr	rgebnisse der	experimentellen	Untersuchung
Labelle of Easanniennass		Bearingse der	experimentement	oncersaenang

2.2.2.5 Anbringung des Mikrofons

Das CMA-M wird für den Flottenversuch mit Dämmmaterial auf die Felge geklebt. Diese Anbringung hat sich in den Experimenten bewährt. Um das Signal des Mikrofons an der Felge zu erfassen und an den Logger zu übertragen, müssen Kabel durch die Felge an das Telemetriesystem geführt werden. Dafür wurde ein spezieller Adapter (siehe Abbildung 12 CAD) für eine Kabeldurchführung und ein Standard Einschraubventil (siehe Abbildung 13 real) entwickelt, hergestellt und erfolgreich getestet.

Abbildung 12: Adapter (grau) für Kabeldurchführung (rot) und Einschraubventil (gelb).



Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

Die Kabeldurchführung wird von der Firma Bartec hergestellt und wird normalerweise für Explosionsschutz verwendet. Durch eine hohle Schraube, die ein M12x1 Feingewinde hat sind die Spezialkabel durchgeführt und mit Harz druckdicht vergossen. Am Kopf der Schraube befindet sich eine passende Dichtung, damit durch das Gewinde keine Luft entweichen kann.

Abbildung 13: Adapter mit Kabeldurchführung und Einschraubventil

Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

2.2.3 GPS

Als GPS wird der MTK3339 Chipsatz verwendet und über UART mit dem Datenlogger verbunden, um die Position und Geschwindigkeit der Fahrzeuge zu erfassen. Die Genauigkeit des GPS wurde ermittelt, indem ein Testfahrzeug fünfmal an der gleichen Position angehalten wurde. Die orthodromische Entfernung von den fünf erworbenen Positionen ist in Abbildung 14a dargestellt und die Standardabweichung der Distanzen beträgt 1,1176 m.

Abbildung 14b zeigt den Vergleich der Fahrzeuggeschwindigkeit aus OBD und GPS. Die Signale haben einen ähnlichen Verlauf und das R-Quadrat ist 0,9968 und NRMSE ist 1,9040 %. Insgesamt hat das GPS eine gute Genauigkeit sowohl in der Geschwindigkeit als auch in der Position.

Abbildung 14: Genauigkeit der Position und Geschwindigkeit des GPS.



Quelle: Masino, J. Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors. Karlsruhe Institute of Technology, Final Thesis, 2018.

2.2.4 RDKS

Der statische Druck und die Temperatur im Reifentorus können das Reifentorusgeräusch beeinflussen und können aufgezeichnet werden. Moderne Fahrzeuge haben ein TPMS an Bord. Direkte TPMS haben einen Sensor, der gewöhnlich am Ventil in jedem Reifen angebracht ist, um den Druck und die Temperatur zu messen. Ähnlich wie bei der Telemetrie des akustischen Sensors wird der TPMS Sensor über einen Beschleunigungssensor aktiviert. Darüber hinaus kann ein Diagnosegerät oder der Empfänger eines High-Line TPMSs den Sensor triggern. Der Sensor wird unter Umgebungsluftdruck kalibriert, um den besseren Wertebereich für die ADC auszunutzen. Die Information des Sensors, Druck, Temperatur, Sensor-ID und RSSI, wird über die Trägerfrequenz des ISM-Bandes, die in Europa 434 MHz entspricht, an den Empfänger übertragen. Das Signal kann über den CAN Bus abgetastet oder von einem externen Datenlogger im Fahrzeug abgefangen und dekodiert werden, was in diesem Projekt umgesetzt wird. Abbildung 15 zeigt den Verlauf der Reifentemperatur und des Reifendrucks, die mit einem TPMS gemessen wurden. Dabei beginnt die Datenakquisition erst ein paar Minuten nach Fahrtbeginn, welcher vor t=0 min liegt. Damit ist zu erklären, dass der Druck bei t=60 min niedriger ist als bei t=0 min, als das Fahrzeug schon bewegt wurde. Der Druck steigt langsamer im Vergleich zur Temperatur, fällt jedoch nach Fahrtende schneller ab. Dieses Phänomen und die Erklärung dafür wurden im Rahmen dieses Projektes nicht weiter verfolgt.

Abbildung 15: Reifentemperatur und Druck mit einem TPMS aufgezeichnet.



Quelle: Masino, J. Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors. Karlsruhe Institute of Technology, Final Thesis, 2018.

2.3 Datenbank

Die Datenübertragung wird mit WLAN realisiert, um Kosten für mobile Datenpläne zu vermeiden, die üblicherweise bei der Verwendung eines Smartphones als Datenlogger realisiert werden. Der Datenlogger verbindet sich mit einem Access Point, der sich z.B. in der Nähe des Parkplatzes des Fahrzeugs befindet, und lädt die Daten auf einen Server, wo sie gespeichert, zusammengeführt und verarbeitet werden. Darüber hinaus kann die Software des Datenloggers automatisiert aktualisiert werden, indem man die Software von einem webbasierten Hosting-Service und Versionskontrollsystem bezieht, in dem der Quellcode verwaltet wird. Abbildung 16 fasst die entwickelte Methode zur Erfassung und zentralen Speicherung der Daten der Sensoren in Karosserie und Reifenhohlraum zusammen. Abbildung 16: Funktionsdiagramm der entwickelten Datenakquisition.



Quelle: Masino J., Luh M., Frey M., and Gauterin F. Inertial sensor for an autonomous data acquisition of a novel automotive acoustic measurement system. In 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, pages 98–101, Mar. 2017

2.4 Hardware

Die Methoden und Sensoren zur automatischen Erfassung von Sensordaten sind die Grundlage für die in dieser Arbeit entwickelten Messgeräte. Die Beschreibung des Aufbaus der Hardware findet sich im Anhang. Das Messsystem zur Erfassung von Trägheitssensordaten, Fahrzeugposition und -geschwindigkeit und zur Übertragung der Daten an eine zentrale Datenbank ist in Abbildung 17 dargestellt. Um die Rohdaten mit dem Label der Ground Truth zu versehen, können zwei Taster angebracht werden. Für jede Messfahrt werden Daten mit einem bestimmten Material (z.B. wenn Asphalt 1, sonst 0) und einem Ereignis (z.B. wenn Schlagloch 1, sonst 0) aufgezeichnet. Nach den Messfahrten wird die binäre Kodierung der Daten der jeweiligen Dateien in die entsprechende Kodierung der Ausgangsgrößen transformiert. Die Unix-Zeit t, ID für den Sensor, Geschwindigkeit v_V, Position und Zeitstempel des GPS lat, lon, und t_{GPS}, Beschleunigungen a und Rotationsraten entlang aller drei Achsen, und die beiden Labels für das Ereignis e und Material m werden aufgezeichnet und in einer csv Tabelle gespeichert (Abbildung 17). Der Schalldruck im Reifenhohlraum wird mit einem selbstentwickelten Messgerät erfasst, das am Rad befestigt ist (Abbildung 19). Die Audiodaten werden per Bluetooth an das Messsystem im Fahrzeug zusammen mit dem SOC der Batterie übertragen und als wav-Datei gespeichert.

Abbildung 17: Messeinheit



Messeinheit, bestehend aus Raspberry Pi, Trägheitssensor, Adafruit ultimate GPS Hat, UPS Hat und zwei Tastern zur Annotierung der Daten. Im Betrieb wird der Trägheitssensor unter dem Raspberry Pi auf der Unterseite des Gehäuses befestigt. Zur Visualisierung wurde das Gehäuse aufgeschnitten.

Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

Abbildung 18: Telemetrie ohne und mit Fahrzeugrad



Telemetrie, bestehend aus einem akustischen Sensor und TPMS im Reifenhohlraum, einem eigenen Y-Ventil für Kabeleinführung und Luft, und dem Funksender in einem Gehäuse (ohne Abdeckung für Visualisierungszwecke). Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

2.5 Software

Damit die Installation der selbstentwickelten Software automatisch abläuft, muss die SD-Karte für den Raspberry Pi mit einem selbstentwickelten Image analog zu einem normalen Raspian OS-Image beschrieben werden. Um die Software auf dem Raspberry Pi herunterzuladen und zu installieren, muss das Gerät über ein LAN-Kabel mit dem Internet verbunden sein, um die selbstentwickelte Software automatisch von einem Git-Repository auf einen webbasierten Hosting-Dienst herunterzuladen. Für den Installationsprozess sind keine manuellen Eingriffe erforderlich. Wenn der Raspberry Pi mit dem Telemeter gekoppelt werden soll und die Software auf dem Bluetooth-Modul des Boards installiert werden soll, muss die Bluetooth-Antenne angeschlossen sein und der Raspberry Pi muss mit dem Telemeter über UART verbunden sein. Die Zugangsdaten für den Access Point und die Datenfernspeicherung zur Übertragung der Daten können im Repository in der Datei *rpi_config.cfg* in den Abschnitten 'WLAN' und 'Samba' oder direkt auf dem Raspberry Pi eingestellt werden.

Der Mikrocontroller des Telemeters, der für die Ansteuerung der Leiterplatte durch rotierende Fahrzeugräder zuständig ist, muss mit einer selbst entwickelten Software geflasht werden. Weiterhin muss die Firmware des Bluetooth-Moduls auf der Karte aktualisiert werden. Die Software des Bluetooth-Moduls wird bei der Installation des Raspberry Pis automatisch installiert.

Die Software für das Messsystem im Fahrzeug wurde hauptsächlich in der Programmiersprache Python entwickelt, Routinen für die Automatisierung wurden als Batch-Skripte implementiert.

Der *sensorrecorder.py* ist der zentrale Messwerterfassungsservice der Software. Der Sammeldienst führt die Verarbeitungsaufgabe jedes Sensors in einem separaten Thread aus, wie in Abbildung 19 dargestellt. Beim Programmstart werden alle Sensoren initialisiert und eingerichtet. Während des Betriebs sammelt der Dienst die Daten aller Sensoren, kombiniert und markiert sie mit einem Zeitstempel und stellt die Daten für das Schreiben in eine Ausgabedatei in eine Warteschlange. Der Write-Out-Task schreibt dann die Messdaten aller Tasks in eine Datei und komprimiert sie schließlich. Wenn ein Sensor oder Empfänger nicht an das Messsystem angeschlossen ist, werden die Daten der anderen trotzdem erfasst.



Abbildung 19: Struktur des zentralen Messwerterfassungsservices sensorrecorder.py

Quelle: Masino J., Luh M., Frey M., and Gauterin F. Inertial sensor for an autonomous data acquisition of a novel automotive acoustic measurement system. In 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, pages 98–101, Mar. 2017

Das *audiorecorder.py* Skript zur Erfassung der Audiodaten vom Telemeter am Rad läuft getrennt vom zentralen Messwerterfassungsservice. Es startet automatisch ausgelöst durch udev, einem Gerätemanager für den Linux-Kernel, sobald eine Bluetooth-Verbindung zwischen dem Raspberry Pi und dem Telemeter hergestellt ist. Der Telemeter ist als Master konfiguriert und versucht aktiv, sich mit dem Raspberry Pi zu verbinden. Ist die Verbindung erfolgreich, startet der Recorder die Audioübertragung über eine Remote-Konsole auf dem Bluetooth-Modul des Telemeters und die Audiodaten werden erfasst und als wav-Datei gespeichert. Neue Dateien werden alle 5 Minuten erstellt, um große Dateien für den Upload auf einen entfernten Dateispeicher zu vermeiden. Die Dateinamen enthalten eine aufsteigende ID und den Zeitstempel, um das Zusammenführen der Audiodaten mit den Daten der anderen Sensoren zu ermöglichen.

Das Skript *wifiupload.py* wird durch das Modul UPS ausgelöst, das die Stromausfälle und das Herunterfahren des Messsystems verwaltet. Das Skript geht davon aus, dass der Motor des Fahrzeugs abgeschaltet ist und ein WiFi-Link zur Verfügung steht. Wenn diese Bedingungen erfolgreich sind, aktualisiert das Skript das Git-Repository und überträgt die Dateien an einen entfernten Dateispeicher. Danach wird das Messsystem ausgeschaltet oder die Aufzeichnungssoftware neu gestartet, wenn die Stromversorgung wiederhergestellt ist.

Während der Datenaufzeichnung kann man sich über LAN mit dem Messsystem verbinden, um die Aufzeichnung zu überwachen und ggf. die Datendateien zu speichern. Auf einem Windows-PC eignen sich hierfür die Programme Putty und WinSCP. Die IP-Adresse des Messsystems ist 192.168.111.3 und die Daten befinden sich im Ordner /home/pi/logging/data.

3 Datenauswertung

3.1 Einflussfaktoren

Abbildung 20 zeigt die Standardabweichung (SD) der Vertikalbeschleunigung und die Rollgeschwindigkeit der Fahrzeugkarosserie für verschiedene Geschwindigkeiten und das Überfahren verschiedener Straßenmerkmale. Das Experiment wurde viermal für jede Geschwindigkeit und Straßenmerkmal durchgeführt. Der Marker im Balkendiagramm stellt den Mittelwert und die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der vier Beobachtungen dar. Der Verlauf der Beobachtungen deutet darauf hin, dass die Schwingung des Fahrzeugs nicht linear von der Geschwindigkeit abhängig ist. Die Vibration, die durch ein Schlagloch verursacht wird, bleibt konstant ab 50 km/h Kilometern pro Stunde, da das Rad nicht vollständig zurückprallt. Im Gegensatz dazu erhöht ein Schachtdeckel über der Oberfläche die Schwingung der Karosserie bei höheren Geschwindigkeiten.

Außerdem nimmt die Schwingung auf Asphalt mit der Geschwindigkeit leicht zu. Diese nichtlinearen Zusammenhänge müssen wir bei der Entwicklung der Methoden zur Verarbeitung der Daten berücksichtigt werden. Auch andere Faktoren, wie z.B. Beladung des Fahrzeuges, können einen Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Fahrzeuges haben.



Abbildung 20: Fahrzeugbewegung durch Straßenhindernisse für verschiedene Geschwindigkeiten.

Quelle: Masino, J. Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors. Karlsruhe Institute of Technology, Final Thesis, 2018.

Daten aus einer experimentellen Studie (Pinay, Gauterin, & Unrau, 2017) wurden analysiert, um den Einfluss verschiedener Variablen auf das SPL_{TC} zu quantifizieren. Die Experimente wurden unter kontrollierten Bedingungen mit dem internen Trommelprüfstand des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik am Karlsruher Institut für Technologie durchgeführt. Tabelle 9 zeigt die Variation der Parameter der betrachteten Variablen für die experimentelle Studie. Insgesamt wurden alle Parameterkombinationen untersucht, was zu 972 Einzelmessungen führte.

Belag	Reifen	Belagtemp. (°C)	Reifentemp. (°C)	Reifendruck (Pa)	Last (N)	Geschw. (m/s)
Asphalt	Sommer	13	17	2	2400	30
Beton	Winter	23	27	2.5	3600	60
		33	37	3	4800	90

Tabelle 9: Untersuchte Variablen und deren Variation.

Die mittlere Profiltiefe von Asphalt ist 0,5621 cm und von Beton 1,3821 cm. Die Lautstärke des Reifenhohlraumgeräusches reicht von 100 bis 200 dB. Da die Daten aus Experimenten stammen und Ausreißern unterliegen, wird eine robuste Regression anstelle einer konventionellen Regression mit der Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Hier wurde eine Bisquare-Gewichtsfunktion mit der Standardabstimmungskonstante von 4,685 verwendet.

Abbildung 21 zeigt den Einfluss verschiedener Variablen auf das SPL des Reifenhohlraumgeräusches und Abbildung 21a zeigt an, dass Geschwindigkeit den größten Einfluss auf das SPL hat. Die Regressionsgeraden zeigen den Einfluss der Variablen an, während die Datenpunkte in Abbildung 21b, c und d auf Geschwindigkeit kontrolliert werden. Die Untertitel repräsentieren die Regressionsgeraden ohne Geschwindigkeitskontrolle. Die Abbildung zeigt, dass die Oberfläche in diesem Experiment die zweitstärkste Wirkung hat.



Abbildung 21: Ergebnisse der Untersuchung von Einflussfaktoren auf das SPL des Reifenholraumgeräusches.

* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001.

Quelle: Masino, J. Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors. Karlsruhe Institute of Technology, Final Thesis, 2018.

Tabelle 10 bestätigt diese Hypothesen, welche die Ergebnisse einer multiplen robusten Regression zeigen. Für die Regression skalieren wir die Werte der Merkmale in den Bereich 0 bis 1 für einen besseren Vergleich der Regressionskoeffizienten.

Tabelle 10: Untersuchte Parameter un	d entsprechender Regressionskoeffizient.
Tubene 10. Ontersuente i di diffeter di	a entopreenender negressionskoemzient.

Belag	Reifen	Belagtemp.	Reifentemp.	Reifendruck	Last	Geschw.
2,63***	-0,35	0,06	-0,15	1,29***	1,61***	12,00***

* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001.

Eine genauere Untersuchung des Einflusses der Geschwindigkeitskontrolle auf alle anderen beschriebenen Variablen zeigt, dass es eine nichtlineare Abhängigkeit von SPL_{TC} gibt. Abbildung 22 zeigt die

Beobachtungen des Experimentes sowie den Verlauf einer robusten linearen und robusten nichtlinearen Regression. Das nichtlineare Regressionsmodell passt besser zu den Beobachtungen, was der MSE von 2,0355 dB für die Residuen des nichtlinearen und 2,8489 dB des linearen Modells bestätigt. Die nichtlineare Abhängigkeit muss bei der Entwicklung einer Methode zur Verarbeitung der Reifenhohlraumgeräuschdaten berücksichtigt werden.



Abbildung 22: Lineare und nicht-lineare Regression für SPL und Geschwindigkeit

Quelle: Masino, J. Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors. Karlsruhe Institute of Technology, Final Thesis, 2018.

3.2 Schätzung des Fahrbahnzustandes

3.2.1 Inertialsensordaten

Das gewichtete Quadratische Mittel (RMS) der Beschleunigung wird verwendet, um die Schwingung des Fahrzeugs aufgrund von Straßenrauigkeit und Hindernissen zu bewerten. Es wird ausgedrückt in m/s² für translatorische Schwingung und rad/s² für die Rotationsschwingung.

Das laufende gewichtete RMS berücksichtigt gelegentliche Schocks und transiente Schwingungen, z.B. durch Schlaglöcher, und befindet sich im Wegbereich oder Frequenzbereich, definiert durch

$$a_{W_{RMS}}(s) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{s_0 - \tau}^{s_0} a_W(s)^2 \mathrm{d}s}$$
$$a_{W_{RMS}}(f) = \sqrt{\int_{f_l}^{f_u} W(f) P(f) \,\mathrm{d}f}$$

wobei $a_W(s)$ die augenblickliche frequenzgewichtete Beschleunigung ist, τ die Integrationsstrecke für den laufenden Durchschnitt ist, W(f) eine Gewichtungsfunktion ist und P(f) das Leistungsspektrum der Zeitreihe von $s_0 - \tau$ bis s_0 . Mit f_l und f_u kann das räumliche Frequenzintervall so gesteuert werden, dass nur die Schwingung des Fahrzeugs aufgrund der Oberfläche und nicht aufgrund anderer Quellen berücksichtigt wird.

Die laufende gewichtete RMS der Beschleunigung wird aus der Vertikalbeschleunigung und der Rollbeschleunigung der Fahrzeugkarosserie berechnet, um die Schwingungen aufgrund von Rauheit und einspurigen Hindernissen wie Schlaglöchern zu erfassen. Um die Empfindlichkeit der Geschwindigkeit auf die Schwingung des Fahrzeugs zu reduzieren, wird ein statistisches Daten-Binning angewendet und die laufende gewichtete RMS der Beschleunigung in Bins mit Geschwindigkeitsintervallen gruppiert. Die Geschwindigkeits-Bins sind frei definierbar. Eine gute Option könnte jedoch sein, Geschwindigkeits-Bins zu definieren, die Geschwindigkeitsintervalle für 30 km/h Zonen, innerstädtische Straßen, Landstraßen und Autobahnen darstellen. Für jeden Geschwindigkeits-Bin und für die normalisierte Vertikal- und Rollbeschleunigung wird ein Score ermittelt. Der finale Score, der als RUI bezeichnet wird, ist das Maximum der Vertikal- und Rollbeschleunigung und reicht von 0 bis 1. Insgesamt wird der RUI für j als Fahrzeug und für i als Index für den Geschwindigkeitsbehälter definiert durch

$$RUI_{j,i} = \max\left(\frac{a_{Z_{RMS}} - \min_{j,i}(a_{Z_{RMS}})}{\max_{j,i}(a_{Z_{RMS}}) - \min_{j,i}(a_{Z_{RMS}})}, \frac{\dot{\omega}_{X_{RMS}} - \min_{j,i}(\dot{\omega}_{X_{RMS}})}{\max_{j,i}(\dot{\omega}_{X_{RMS}}) - \min_{j,i}(\dot{\omega}_{X_{RMS}})}\right)$$

3.2.2 Akustiksensordaten

Die Daten des Akustiksensors im Reifenhohlraum werden mit der gleichen Methode verarbeitet, wie sie für den Inertialsensor beschrieben wurde. Jedoch basieren sie hauptsächlich auf dem SPL des Reifenhohlraumgeräusches als Merkmal. Dabei geht es eher darum, Oberflächen mit unterschiedlichen Makrotexturen und damit einem Straßenrauigkeitsindex (RRI) zu schätzen, als Straßenhindernisse oder Unebenheiten zu erkennen. Allerdings ist das SPL Merkmal empfindlicher auf die Geschwindigkeit und deshalb werden feinere Geschwindigkeitsintervalle mit 2 m/s Schritten verwendet.

Darüber hinaus werden die Daten nach Reifentemperatur, Reifendruck und Belastung gefiltert, um nur vergleichbare Bedingungen zu berücksichtigen und Daten, die unter extremen Bedingungen gewonnen wurden, zu vermeiden. Zum Beispiel nimmt der Reifenhohlraum beim Parken des Fahrzeugs eine ähnliche Temperatur der Umgebung an, die von -10 Grad Celsius im Winter bis 40 Grad Celsius im Sommer reichen kann. Jedoch haben mehrere Untersuchungen in unterschiedlichen Umgebungsbedingungen gezeigt, dass die Temperatur ungefähr konstant bei 35 bis 40 Grad Celsius nach 10 Minuten Fahrt bleibt. Folglich werden der Beginn einer Fahrt und längere Stopps, wenn die Reifentemperatur wieder sinkt, analog zum Reifendruck herausgefiltert, der ungefähr der Kurve der Reifentemperatur folgt.

3.3 Erkennung von Fahrbahnereignissen

Annotierte Daten ermöglichen die Detektion spezifischer Objekte oder Fahrbahnbeläge mit spezifischen Eigenschaften durch überwachte Klassifizierung oder die Abschätzung der Straßenrauheit durch überwachte Regression. Der wichtigste Teil der Verarbeitung von beschrifteten Daten besteht darin, Merkmale zu finden, die die gewünschten Klassen im Merkmalsraum trennen können. Erstens werden die Kandidaten von Merkmalen auf der Grundlage theoretischer und physikalischer Überlegungen oder der Analyse von Daten aus Voruntersuchungen, die als Feature Engineering bezeichnet werden, gebildet. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Feature-Learning-Techniken, um automatisch Darstellungen der Rohdaten für die Klassifizierung zu finden. Letzteres wird in diesem Projekt jedoch nicht berücksichtigt. Die Merkmals-Kandidaten werden automatisch mit der Methode MANOVA bewertet und die besten Features zur Trennung der Klassen werden ausgewählt, um die Dimension des Merkmal-Vektors zu reduzieren und eine Überanpassung zu vermeiden. Überarbeitete Modelle haben eine schlechte Verallgemeinerung mit zu vielen Parametern im Vergleich zur Anzahl der Beobachtungen. Dann beschreibt das Modell eher zufälliges Rauschen als die zugrundeliegende Beziehung.

Es ist schwierig, den Merkmalsraum mit höheren Dimensionen zu veranschaulichen. Daher kann sie durch Merkmalsaggregation weiter reduziert werden, z.B. durch die Diskriminanzfunktionsanalyse.

Damit kann der aggregierte Merkmalsraum mit z.B. zwei Dimensionen visualisiert und untersucht werden, ob die Klassen trennbar sind. Der Nachteil dieser Methode ist eine Abnahme der Genauigkeit der Klassifizierung und die schwierige Interpretation der aggregierten Merkmale.

Schließlich wird die Regression oder Klassifizierung mit einer Support Vector Machine (SVM) durchgeführt. Dieses Projekt unterscheidet zwischen der Klassifizierung von Straßenobjekten, Straßenzustand oder einzelnen Hindernissen wie Schlaglöchern und der Abschätzung der Straßenrauigkeit innerhalb der Makrotextur. Die Objekterkennung basiert auf der vom Trägheitssensor gemessenen Schwingung der Fahrzeugkarosserie, während die Straßenrauigkeitsschätzung auf der vom Reifenhohlraumgeräusch erfassten Reifenschwingung basiert. Daher besteht der erste Datensatz aus den Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten des Fahrzeugs in drei Richtungen und dem zweiten aus dem Schalldruck des Reifenhohlraums. Beide Datensätze werden um abhängige Parameter erweitert, wie z.B. die Fahrzeuggeschwindigkeit.

Für die Merkmalsextraktion von Inertialsensordaten werden die folgenden Distanzseriendaten berücksichtigt:

- Vertikalbeschleunigung,
- ► Rollrate,
- ► Nickrate.

Darüber hinaus wird die Roll- und Nickbeschleunigung sowie der Ruck des Fahrzeugs unter Ausnutzung der Abweichung der Vertikalbeschleunigung im Zeitbereich berechnet. Mit der Kurzzeit-Fourier-Transformation werden die Distanzseriendaten in den Frequenzbereich transformiert. Hiermit können Eigenschaften, die auf bestimmten Frequenzbändern beruhen, untersucht werden. Daher werden die drei Distanzseriendaten um die folgenden Datenströme erweitert, was uns zu insgesamt 7 Datenströmen führt:

- Rollbeschleunigung,
- Nickbeschleunigung,
- Vertikalbeschleunigung,
- ► Ableitung der Vertikalbeschleunigung,
- ► Kurzzeit Fourier transformierte Vertikalbeschleunigung,
- ► Kurzzeit Fourier transformierte Nickbeschleunigung,
- ► Kurzzeit Fourier transformierte Rollbeschleunigung.

Die Merkmale werden für Fenster mit einer bestimmten Länge im Entfernungsbereich und einer bestimmten Überlappung berechnet. Wird ein größerer Abstand gewählt, haben kurze Amplituden, z.B. durch Schlaglöcher, einen schwächeren Einfluss auf den Wert von Merkmalen, die das Gesamtsignal enthalten, wie z.B. die Standardabweichung. Diese kurzen Amplituden können durch Verkürzung der Fenstergröße oder durch die Verwendung von Merkmalen, die Extrema berechnen, erfasst werden.

Aus den Daten der Distanzserien berechnen wir die

- Standardabweichung,
- Peak-to-peak,
- Durchschnitt.

Für die kurzzeitig transformierten Fourier-Daten und den Spektralschwerpunkt extrahieren wir die Merkmale

- Durchschnitt
- Standardabweichung
- ► Maximum

für den RMS der folgenden Frequenzbänder (1/m): [0,1; 0,5] [0,5;15] [15; 20] [0,1; 25] [0,1; 50]

Die besten Merkmale aller berechneten Merkmale werden mit der Methode MANOVA ausgewählt. Die besten Merkmale sind

- ▶ Peak-to-peak Nickbeschleunigung,
- ▶ Peak-to-peak Rollbeschleunigung,
- Maximum des Rucks,
- ► RMS der vertikalen Beschleunigung,
- Geschwindigkeit.

Abbildung 23 zeigt die Klassifikation mit den besten Merkmalen von Material und Ereignissen im aggregierten Merkmalsraum.





Quelle: Masino, J. Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors. Karlsruhe Institute of Technology, Final Thesis, 2018.

3.4 Erkennung der Fahrbahnrauigkeit

Fahrbahnbeläge mit unterschiedlichen Eigenschaften, insbesondere mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen, können auf der Grundlage von Leistungsmerkmalen verschiedener Frequenzbänder klassifiziert werden. Diese Arbeit verfolgt die Schätzung eines Straßenrauhigkeitsindex auf der Basis der Reifenvibration, die durch das SPL des Reifenhohlraumgeräusches repräsentiert wird, und wendet eine SVM-Regression an.

Die Geschwindigkeit hat einen starken Einfluss auf den Schalldruck im Reifenhohlraum und wird als Merkmal für diese Regression aufgenommen wurde. Weiterhin werden Reifendruck, Reifentemperatur und Fahrzeuglast berücksichtigt, obwohl der Einfluss im Vergleich zur Geschwindigkeit geringer ist. Insgesamt kann der RRI für jedes Fenster mit folgender Regressionsfunktion geschätzt werden

$$RRI = \beta_1 * SPL_{TC} + \beta_2 * v + \beta_3 * p + \beta_4 * T + \beta_5 * P + \beta_0$$

mit den folgenden Eigenschaften:

SPL_{TC}: Sound pressure level des Reifenhohlraumgeräusches,

- v: Durchschnitt der Geschwindigkeit,
- p: Durchschnitt des Reifendrucks,
- T: Durchschnitt der Reifentemperatur,
- P: Durchschnitt der Fahrzeuglast.

Die Merkmale sind skaliert auf den Bereich von 0 bis 1 und eine polynominale Kernfunktion der Ordnung 2 berücksichtigt das nichtlineare Verhältnis von Geschwindigkeit und SPL des Reifenhohlraumgeräuschs. Weitere Merkmale können integriert werden, wie z.B. Reifentyp, Umgebungstemperatur, Wasser oder Schneefall, etc. Die Parameter sind für jeden Reifen und Fahrzeug unterschiedlich, da beide Parameter einen individuellen Einfluss auf den Schalldruckpegel haben und damit die Messungen erheblich beeinflussen (siehe Abschnitt 3.1). Die Merkmale werden auf den Bereich von 0 bis 1 normiert, damit alle Merkmale vergleichbar sind und ein Merkmal nicht durch das statistische Modell als unbedeutend interpretiert wird, nur weil es geringe Schwankungen oder einen kleinen Datenbereich aufweist. Mit einer großen Anzahl an Daten wird gewährleistet, dass die Normierung auch für weitere Daten genutzt werden kann.

Das vorgestellte Modell und die Vorgehensweise sind universell anwendbar. Für beliebige Kombinationen aus Fahrzeug, Reifen, Wetter können unterschiedliche Regressionsfunktionen geschätzt werden und für zukünftige Daten zur Schätzung des Rauigkeitsindex genutzt werden. In Abschnitt 4.3 wird exemplarisch eine Regressionsfunktion dargestellt und erläutert.

Der Schwerpunkt dieses Projektes war die Neuentwicklung des Akustischen Torusmessgeräts und die Sammlung erster Erfahrung des neuen Gerätes. Es bedarf sicher weiterer Messfahrten und Auswertungen mit den vorgestellten Methoden.

4 Ergebnisse

Insgesamt wurden Daten mit dem Inertialsensor als auch mit dem Akustiksensor mit verschiedenen Fahrzeugen (Ford Galaxy, Mercedes-Benz S-Klasse, Smart, VW Golf Variant, VW Golf, BMW 1er, Mercedes-Benz C-Klasse) eingefahren. Die gesammelten Daten belaufen sich auf eine Strecke von >1000 km. Im Folgenden werden exemplarische Ergebnisse gezeigt.

4.1 Schätzung des Fahrbahnzustandes

Abbildung 24 zeigt die Schätzung des Straßenunebenheitsindex (RUI). Die Daten wurden mit einem VW Golf erfasst. Der Algorithmus erkennt mehrere Stellen mit starken Unebenheiten, die in der Abbildung markiert sind.

Abbildung 24: Schätzung der Straßenunebenheit in Niefern, Deutschland (rot entspricht einem schlechten Straßenzustand, gelb einem mittlere, grün einem guten).



Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

Label 1 und 2 sind Brückenspalten, die eine starke Anregung auf die Schwingungen des Fahrzeugs haben, und Label 3 und 4 sind schwere Fahrbahndefekte. Insgesamt beträgt das Bestimmtheitsmaß für den geschätzten RUI im Vergleich zum Ground Truth für die gesamte Testfahrt um Niefern 0,5373 und für die ungewichtete Aggregation mehrerer Fahrten 0,6313. Das Bestimmtheitsmaß für ein anderes Fahrzeug, einen BMW 1er, für die gleiche Teststrecke beträgt 0,4964. Als Ground Truth dient der IRI (International Roughness Index), der die standardisierte Rauheitsmessung darstellt. Die Daten für diese Strecke stammen aus der ZEB (Zustandserfassung und –bewertung) und wurden im Jahr 2015 erhoben. Die Geschwindigkeitsintervalle für das entwickelte Schätzverfahren sind 0-6, 6-12, 12-18, 18-24, 24-30, >30 m/s, für τ wurden 5 m gewählt.

Abbildung 25 zeigt die Schätzung des RUIs auf der Grundlage von Daten, die zwischen 2016 und 2017 mit einem Ford Galaxy erfasst wurden. Die Labels 1 bis 3 zeigen Straßenabschnitte mit starken Unebenheiten, die vom Fahrer bestätigt wurden.

Abbildung 25: Schätzung der Straßenunebenheit in Karlsruhe, Deutschland (rot entspricht einem schlechten Straßenzustand, gelb einem mittlere, grün einem guten).



Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

4.2 Erkennung von Fahrbahnereignissen

Um den Klassifikator zu testen (siehe Abschnitt 3.3 bzgl. wichtigste Merkmale und welche Klassen ermittelt wurden), wird ein Datensatz von mehr als 200 km Straßendaten klassifiziert und auf Straßenkarten dargestellt. Die Ergebnisse sind vielversprechend und stellen in vielen Fällen den tatsächlichen Straßenzustand dar. Nachfolgend sind einige Beispiele für klassifizierte Gebiete aufgeführt.

Das erste Beispiel zeigt die Ergebnisse der Ereignisklassifizierung auf zwei verschiedenen Autobahnen bzw. Landstraßen (Abbildung 26). Die obere Straße mit Label 1 ist eine frisch renovierte Asphaltautobahn mit nahezu schadlosem Verlauf und die untere mit Label 2 ist eine schlecht ausgebaute Asphaltstraße mit vielen mittleren und schweren Schäden.

Die Klassifikation hat die obere Fahrbahn erfolgreich als *gute Straße* vorausgesagt. Die meisten Teile der unteren Straße wurden als *leichte Schäden* vorhergesagt und einige Punkte sogar als *Schlaglöcher*. Die Ergebnisse stellen den Straßenzustand sehr genau dar.



Abbildung 26: Klassifikationsergebnis im Südwesten von Karlsruhe, Deutschland.

Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

Das zweite Beispiel zeigt Daten, die in einem Stadtgebiet in Karlsruhe erfasst wurden, die Vorhersagen werden in Abbildung 27 gezeigt. Die Straßen in diesem Gebiet sind schlecht erhalten und an einem Fußgängerüberweg (Label 1) gibt es eine *Geschwindigkeitsschwelle*. Das GPS-Signal ist an manchen Stellen etwas wackelig, da hohe Gebäude und enge Straßen die Signale stören. Das Klassifikationsmodell prognostiziert korrekt die *Geschwindigkeitsschwelle* (Label 1) für alle Überfahrten und ein *Schlag-loch* (Label 2) für beide Fahrtrichtungen.



Abbildung 27: Klassifikationsergebnis in Karlsruhe, Deutschland

Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

Der dritte interessante Sektor wird in Abbildung 28 gezeigt. Die Schlaglöcher (Label 2 und 3), die sich am Rande der Fahrlinie befanden, wurden mehrfach überfahren und der Klassifikator prognostiziert die schweren Schäden entsprechend. Manchmal ist die Ausgabe an den Straßenabschnitten nicht *Schlagloch*, sondern *leichter Schaden* oder sogar *guter Zustand*. Der Grund könnte darin liegen, dass das Schlagloch vom Fahrer vermieden wurde. Der Bahnübergang (Label 1) ist erhöhter als andere Kreuzungen und wird in wenigen Fällen falsch als *Geschwindigkeitsschwelle* klassifiziert.



Abbildung 28: Klassifikationsergebnis in Karlsruhe, Deutschland.

Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

4.3 Erkennung der Fahrbahnrauigkeit

Abbildung 29 zeigt die Beobachtungen und die geschätzte Regressionsfunktion für einen Teil der erfassten Daten mit einem BMW 1er, Sommerreifen, auf der Strecke von Karlsruhe nach Niefern (Mehrfachfahrten). Die ermittelte Regressionsfunktion lautet näherungsweise:

$$RRI = 0,007846 * SPL_{TC} + 0,0003547 * v - 0,3548$$

Da der Reifendruck, die Reifentemperatur und die Fahrzeuglast nur einen geringen Einfluss auf den Schalldruckpegel im Reifentorus haben (siehe Abschnitt 3.1), wurden diese hier nicht in die Regression mit einbezogen. Weiterhin eignen sich für die Darstellung nur zwei Merkmale. Der Regressionsfehler, ausgedrückt als normalisierter mittlerer quadratischer Fehler, einer fünffachen Kreuzvalidierung aller erfassten Daten beträgt durchschnittlich 0,00454 und die Standardabweichung 0,00015. Die Zahl und der berechnete Fehler deuten darauf hin, dass die Regressionsfunktion in der Lage ist, die tatsächlichen Beobachtungen sehr gut zu reproduzieren, und sie kann auch zur Abschätzung der Fahrbahnrauheit für zukünftige Messungen verwendet werden.



Abbildung 29: Geschätzte Regressionsfunktion zur Schätzung der Straßenrauigkeit.

Quelle: Masino, J. Road Condition Estimation with Data Mining Methods using Vehicle Based Sensors. Karlsruhe Institute of Technology, Final Thesis, 2018.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt wurden neuartige Methoden zur umfassenden und automatischen Abschätzung des Straßenzustandes mit fahrzeugbasierten Sensoren entwickelt und angewandt. Um die Daten der Sensoren zu erfassen, wurde ein kostengünstiges Messsystem für den Flotteneinsatz entwickelt. Der Installations- und Betriebsablauf des Messsystems erfordert kaum manuelle Eingriffe und die Daten können automatisch in eine zentrale Datenbank übertragen werden.

Ein Straßenunebenheitsindex (RUI) wird mit einem Trägheitssensor in der Fahrzeugkarosserie und ein Straßenrauigkeitsindex (RRI) mit einem Akustiksensor in der Reifenkavität geschätzt. Die Schätzung der Indizes basiert auf der Messung der Schwingungen von Fahrzeug und Reifen mit den genannten Sensoren.

Aus Experimenten unter kontrollierten Bedingungen wurde gezeigt, dass die Schwingungen nicht nur von Straßenrauigkeit oder Unebenheiten abhängen, sondern auch von Einflüssen aus der Umgebung oder dem Fahrzeugbetrieb, insbesondere von der Geschwindigkeit. Um die Wirkung dieser Einflüsse zu vermindern, werden die Indizes für bestimmte Bins geschätzt, basierend auf den Haupteinflüssen. Der Vergleich mit dem Ground Truth legt nahe, dass die Schätzer mit dem tatsächlichen Straßenzustand übereinstimmen. Die Schätzer verschiedener Fahrzeuge können kombiniert und auf Karten visualisiert werden.

Für den Trägheits- und Akustiksensor wird eine überwachte Lerndatenverarbeitung zur Klassifizierung von Fahrbahnmerkmalen und Straßenrauigkeiten eingeführt. Zu den wichtigsten Neuerungen gehört eine Merkmalsauswahl mit MANOVA, um die Komplexität zu reduzieren und eine Überanpassung des Klassifikators zu vermeiden. Zwei Klassifikatoren für die Inertialsensordaten wurden entwickelt, um Straßeneigenschaften zu schätzen.

Die Vorhersage der Methoden wurde untersucht und die Ergebnisse deuten auf eine gute Performance hin. Generell stellen der Trägheitssensor und der Akustiksensor eine sehr gute Möglichkeit dar, Informationen über den Reifen-/Fahrbahnkontakt kostengünstig und flächendeckend zu sammeln.

Die Kombination dieser Sensoren mit einer Kamera könnte die optimale Lösung für eine mobile Auswertung des Zustands der Straßeninfrastruktur sein.

Insgesamt wurden im Projekt die angestrebten Ziele erreicht:

- Weiterentwicklung eines bestehenden Prototyps zur Aufzeichnung des Reifeninnengeräusches,
- ▶ Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Datenauswertung.

Die Trends Digitalisierung und Automatisierung machen nicht bei der Straßenzustandsüberwachung halt. Die derzeitige Praxis zur Bewertung der Straßeninfrastruktur ist mühsam und kostspielig. Die entwickelten Methoden in dieser Arbeit können die gegenwärtige Praxis verbessern oder teilweise ersetzen. Die Datenverarbeitungsmethoden können auf Steuergeräten moderner Fahrzeuge, die als Sensorplattformen dienen, betrieben werden. Da das System modular aufgebaut ist, können zudem Anzahl und Art der Sensoren sowie die Sensormodalität variiert werden. Aber auch ein Fuhrpark kann mit dem vorgestellten System ausgestattet werden.

6 Quellenverzeichnis

Bschorr, O. Leistungsverhaeltnis des in den Aussen- und in den Torusraum abgestrahlten Reifenlaerms. Reifen Fahrwerk Fahrbahn. Tagung der VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Hannover: VDI Verlag GmbH. 1999.

Krauss, O., and Gauterin, F. Analysis of Tire Road Noise Using a Tire Cavity Sound Measurement System. EURONOISE Prague 2012 - Conference Proceedings. Prag. 2012.

Pinay, J., Gauterin, F., and Unrau, H.-J. Experimental Study of the Tire Cavity Noise and Its Correlation with the Exterior Tire Road Noise Emission. VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn. 2017

Masino J., Frey M., Gauterin F., and Sharma R. Development of a highly accurate and low cost measurement device for Field Operational Tests. In 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, pages 74–77, Feb. 2016

Masino J., Daubner B., Frey M., and Gauterin F. Development of a tire cavity sound measurement system for the application of field operational tests. In 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon), pages 1–5, Apr. 2016

Masino J., Luh M., Frey M., and Gauterin F. Inertial sensor for an autonomous data acquisition of a novel automotive acoustic measurement system. In 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, pages 98–101, Mar. 2017

Masino J., Wohnhas B., Frey M., and Gauterin F. Identification and prediction of road features and their contribution on tire road noise. In EUROMECH578 Rolling Contact Mechanics for Multibody System Dynamics, pages 28–48, Apr. 2017

Masino J., Foitzik M.-J., Frey M., and Gauterin F. Pavement type and wear condition classification from tire cavity acoustic measurements with artificial neural networks. The Journal of the Acoustical Society of America, 141(6):4220–4229, June 2017

Masino J., Pinay J., Reischl M., and Gauterin F. Road surface prediction from acoustical measurements in the tire cavity using support vector machine. Applied Acoustics, 125:41–48, Oct. 2017

Masino J., Thumm J., Frey M., and Gauterin F. Learning from the crowd: Road infrastructure monitoring system. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 4(5):451–463, 2017

Masino J., Levasseur G., Frey M., Gauterin F., Mikut R., and Reischl M. Charakterisierung der Fahrbahnbeschaffenheit durch Data Mining von gemessenen kinematischen Fahrzeuggrößen. at-Automatisierungstechnik , 65(12):867–877, 2017

Hofmockel J., Masino J., Thumm J., Sax E., and Gauterin F. Robust road condition and feature estimation through multiple vehicle fusion. Cogent Engineering , 2018

7 Anhang A: Aufbau und Inbetriebnahme der Messsysteme

Hinweis: Für alle Abbildungen im Anhang gilt: Quelle: eigene Darstellung, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugtechnik

1 Überblick

Die Messsysteme, deren Aufbau in dieser Anleitung vorgestellt wird, sind Teil des entwickelten Gesamtkonzeptes zur Vermessung der Straßenverkehrsinfrastruktur. Insbesondere werden hier der Aufbau des Datenloggers und Beschleunigungssensors, sowie des Mikrofons und der Telemetrie, beschrieben. Eine Empfangsantenne für das TPMS kann nachgerüstet werden, die entsprechende Software ist auf dem Datenlogger integriert. Alternativ können die Daten mit einem externen Gerät aufgezeichnet oder abgelesen werden. Die Installation der Software des Datenloggers erfolgt automatisch. Es müssen lediglich die Credentials für den Access-Point und den Server geändert werden.

Die Datenaufzeichnung des Datenloggers beginnt, sobald dieser mit Strom versorgt wird. Wird die Stromversorgung unterbrochen, startet die unterbrechungsfreie Stromversorgung und der Datenlogger versucht sich mit einem Access-Point zu verbinden, um die Daten zu übertragen. Ist dies nicht möglich oder ist die Übertragung beendet, fährt der Datenlogger herunter. Die akustische Messung startet, sobald sich das Rad dreht und wird automatisch beendet, sobald das Fahrzeug abgestellt wird.

2 Hardware

2.1 Teilliste

Links für eigenentwickelte Teile (3D Druck Gehäuse, Platine) sind verfügbar bis 30. April 2018, Passwort: uba_anleitung

Datenlogger und Inertialsensor

Bezeichnung	Modell	Link	Menge
3D Druck Gehäuse	[Eigenentwicklung]	https://bwsyncands- hare.kit.edu/dlpw/fi5NkDY8UZdMZYjJpSDTpmzq/Pi- Gehaeuse_20171115.zip	1
Beschleunigungs- ensor	Sparkfun LMS9DS1	https://www.sparkfun.com/products/13284	1
Raspberry Pi	Pi 2 Model B V1.1	http://de.rs-online.com/web/p/entwicklungskits-pro- zessor-mikrocontroller/8326274/	1
Wlan stick	Edimax	http://de.rs-online.com/web/p/wireless-adap- ter/7603621/?sra=pmpn	1
Micro SD Karte	Samsung EVO Plus Micro SDHC 32GB	http://de.rs-online.com/web/p/sd-speicherkar- ten/1449017/	1
Akku	PD905060H2 3,7V 3000mAh	https://shop.olmatic.de/de/zubehoer/7-akku3000- 4260434190043.html	1
DC Buchse	DC Buchse 2,1mm gerade Tafelmontage	http://de.rs-online.com/web/p/dc-buch- sen/0487832/	1
Automotive Steckver- bindung	Schwarz, 1-reihig	https://de.rs-online.com/web/p/automotive-steck- verbinder/8146230/	1
USV	S.USV Pi Advanced	https://shop.olmatic.de/de/usv-raspberry-pi/2-susv- pi-advanced-4260434190029.html	1
GPS Hat	Adafruit Ultimate GPS HAT	https://www.adafruit.com/product/2324	1
GPS Antenne	RF Solutions GPS-Antenne ANT-GPSMG	http://de.rs-online.com/web/p/gps-anten- nen/7043464/	1
Bluetooth Stick	Bluetooth Adapter 2.1 Class 1 USB w/Ant	http://de.rs-online.com/web/p/bluetooth- adapter/1245558/	1
Bluetooth Antenne	DELOCK 88987 :: LTE An- tenne, SMA	https://www.reichelt.de/LTE-UMTS-GPRS/DELOCK- 88987/3/index.html?ACTION=3&GROU- PID=3724&ARTICLE=160099	1
Adapter SMA	Adapter, SMA RP - SMA, 50Ω	http://de.rs-online.com/web/p/hf-und-koax- adapter/7620011/?sra=pmpn	1
Adapter UFL	RF Koaxialkabel, Buchse SMA auf UFL-Stecker	http://de.rs-online.com/web/p/koaxialkabel-konfek- tioniert/7942897/	1
Pinheader gewinkelt	Stiftleisten THT Raster 2,54mm gewinkelt	https://www.amazon.de/Pinheader-Stiftleisten-Ras- ter-zweireihig-4-po- lig/dp/B00I3HA58E/ref=sr_1_cc_5?s=aps&ie=UTF8& qid=1510136861&sr=1-5-catcorr&keywords=Pinhea- der+4+polig	2
Pinheader	Buchsenstecker Raster 2,54mm zweireihig	https://www.amazon.de/Pinheader-Buchsenstecker- Raster-zweireihig-4-po- lig/dp/B0095HDZ42/ref=sr_1_4?s=compu- ters&ie=UTF8&qid=1510136861&sr=1- 4&keywords=Pinheader+4+polig	1
Aderendhülse	RS Pro Aderendhülse blau	http://de.rs-online.com/web/p/aderendhul- sen/1571200/	1

Technische Aspekte der Überwachung der akustischen Qualität der Fahrwege im Straßenverkehr

Bezeichnung	Modell	Link	Menge
Gewindestangen M2,5	2x52mm, 2x38mm, 1x 65mm		
Schrauben	M2,5x3mm		4
Muttern	M2,5 Innendurchmesser		16
Knopfzelle	Panasonic Knopfzelle, CR1220	http://de.rs-online.com/web/p/knopfzellen-batte- rien/4574713/	1
Beschleunigungs- ensor	Sparkfun LSM9DS1	https://www.sparkfun.com/products/13284	1
Abstandshalter	M2,5 x 10mm		8
Antivibrationsmatte		https://www.amazon.de/hochwertige-Antivibrations- matte-schwingungsd%C3%A4mpfende-Waschma- schinen-elektri- sche/dp/B015Y6PIWO/ref=pd_day0_79_1?_en- coding=UTF8&psc=1&refRID=X2E- CYF04TW30SFJSXDKA	1
UART Adapter	FTDI Chip TTL-232R-Rpi Kabel, USB-auf-UART	https://de.rs-online.com/web/p/entwicklungskits-in- terface/7676200/?sra=pstk	1



Mikrofon und Telemetrie

Bezeichnung	Modell	Link	Menge
3D Druck Gehäuse	[Eigenentwicklung]	https://bwsyncands- hare.kit.edu/dlpw/fiXhdgBFMXdGx1jW2PL2iDmc/Te- lemetrieGehaeuse_20171115.zip	1
Platine	[Eigenentwicklung]	https://bwsyncands- hare.kit.edu/dlpw/fiS5aB8VeV9HspSTxQ19kmtw/Pla- tineDateien_20170706.zip	
USB Buchse	USB-Stecker MICRO-AB USB RECEPT R/A	https://www.digikey.de/pro- ducts/de?keywords=MUSBK15230	1
Cover USB	USB - MikroUSB B Abde- ckung	https://www.digikey.de/products/de?keywords=732- 4567	1
Schraub USB	Schraube, Sub-D	http://de.rs-online.com/web/p/pfosten-und-absperr- zubehor/6126681/?sra=pmpn	1
Kabelverschraubung	SES M6 Kabelverschrau- bung	http://de.rs-online.com/web/p/kabelverschraubun- gen/3646924/?sra=pstk	1
Akku	PD905060H2 3,7V 3000mAh	https://shop.olmatic.de/de/zubehoer/7-akku3000- 4260434190043.html	1
Mikrofon	Electret Condenser Micro- phones	https://www.digikey.de/pro- ducts/de?keywords=cma-4544pf-w	1
Ventil	Einschraubventil mit Dichtring	https://www.alligator-ventilfabrik.de/index.php?Ein- schraubventil-mit-Dichtring900845	1
Leitungsdurchfüh- rung	druck-/vakuumdicht M12x1; 4-polig; Glas Stahl vernickelt	https://www.bartec.de/	1
Schrauben	M6x14mm		5
Schrauben	M2,5x8 mm		13
Mutter	M10x1 selbstsichernd		1
U-Scheibe	A6,4		5
Gewindeeinsätze	KerbKonus Ensat-S M2,5	http://www.kerbkonus.de/de/index.php	13
Gewindeeinsätze	Jäger Ensat Typ 302 M6	https://www.schrauben-jaeger.de/shop/de/gewinde- einsaetze/	1
Alublock			1
Kabel zu Ventil	50 cm		1
Kabel zu Platine	Koaxialkabel (40cm)		1
Dichtung	BLRG9-T	http://www.buer-kg.de/	1
Dichtungspapier	elring Dichtungspapier "ABIL® N", 0,50mm	https://www.tecparts.com/werkstatt-und-elekt- rik/werkstatt/dicht-und-klebemittel/dichtungspa- pier/elring-dichtungspapier-abil-n-p581436/elring- dichtungspapier-abil-n-050-m-581346/?fh_secon- did=581346&fh_location=%252f%252fca- talog01%252fde_DE%252f%2524s%253d10591915&f h_modification=	



2.2 Beschreibung

Datenlogger und Inertialsensor

3D Gehäuse Drucken

GPS Hat Löten, Batterie einsetzen (Hat, Kabel, Stecker, Batterie)

- ► Kabel zurechtschneiden (4x ca 5cm)
- ▶ Pin SDA an Stecker 1 (Grün)
- ► Pin SCL an Stecker 1 (Gelb)
- ► GND an Stecker 1
- ► 3V an Stecker 1

Batterie einsetzen

Optional für Taster:

- ▶ Pin 17 (Pink) an Stecker 2
- ▶ Pin 22 (Weiß) an Stecker 2
- ► 3V an Stecker 2

Inertialsensor löten

- ► Kabel an GND
- ► Kabel an VDD
- ► Kabel an SDA
- ► Kabel an SCL
- alle Kabel an Stecker Buchse (Belegung wie in Punkt 1)





DC Stecker Löten (DC Buchse, Kabel, Aderendhülsen)

► 2x 10 cm Kabel

Kabel an DC Buchse löten (rot innen, schwarz außen)

Aderendhülsen an Kabel klemmen

USV DC Stecker anschließen (S.USV, DC Stecker)

► Polung beachten (rot + und schwarz -)

- Inertialsensor festschrauben (Inertialsensor, 4x M2,5x3mm Schrauben)
 - ► Kabelführung beachten

Schrauben vorbereiten (4x Gewindestangen, 4 Muttern)

► Muttern auf Gewindestangen drehen (siehe Bild)

Gewindestangen an Raspberry (Raspberry, 4x Gewindestange, 4x Distanzstücke)

- Gewindestangen von unten in Raspberry einfädeln (Die 2 langen Gewindestangen müssen bei den USB und Ethernet Ports sein)
- ► Distanzstücke von oben auf die Gewindestangen









S.USV auf anbringen (Raspberry, S.USV, 4x Distanzstücke)

- ► S.USV von oben auf die Gewindestangen
- ► Distanzstücke von oben auf die Gewindestangen

GPS Hat anbringen (Raspberry, GPS Hat, 4x Muttern)

- ► GPS Hat von oben auf die Gewindestangen
- ► GPS Hat mit Muttern fixieren

Raspberry in Gehäuse Befestigen (Raspberry, Gehäuse, 4x Muttern)

- ► Bild: Ansicht von unten
- Raspberry inkl. Hats in Gehäuse einsetzen und von unten mit Muttern Festschrauben

Buchsen montieren (UFL Adapter, DC Buchse)

- ► DC Buchse festschrauben
- ► UFL Adapter festschrauben und an GPS Hat anschließen
- ► Inertialsensor an GPS Hat anschließen

Batterie in Deckel schieben (Deckel, Batterie)

Kabelrichtung beachten







Deckel an Gehäuse Schrauben (Gewindestange 65mm, 2x Muttern)

- Mit Gewindestange Deckel mit Gehäuse verbinden und mit 2 Muttern fixieren
- ► Batterie an S.USV anschließen



Deckel Befestigen (2x Muttern)

► Deckel schließen und mit 2 Muttern befestigen



SMA Adapter auf Bluetooth Stick schrauben










Mikrofon und Telemetrie

3D Gehäuse drucken



Löcher nachbohren (M4,3 Bohrer, M9 Bohrer, 3D Gehäuse, 3D Zwischenscheibe)

- 4x nachbohren in Zwischenscheibe mit M4,3 Bohrer
- ► 4x nachbohren Gehäuse (innen) mit M4,3 Bohrer
- ► 5x nachbohren Gehäuse (Mittelring) mit M4,3 Bohrer
- ▶ 1x nachbohren in Kabeldurchführung mit M9 Bohrer







Gewindeeinsätze einschrauben (13x M2,5, 1x M6, Micro USB Buchse, Schrauben für Micro USB Buchse)

- ► 4x M2,5 Gewindeeinsatz in Zwischenscheibe
- ▶ 9x M2,5 Gewindeeinsatz in Gehäuse
- ▶ 1x M6 Gewindeeinsatz in Kabeldurchführung
- ► Micro USB Buchse festschrauben



Akku einsetzen (Akku)

► Kabelführung beachten

Zwischenscheibe einsetzen und festschrauben (4x M2,5 Schrauben)

▶ Platte mit 4x M2,5 Schrauben befestigen

Platine

- Bauteile und Platinenlayout sind in unter dem Link in der Teileliste zu finden
- ► Platine kann extern geätzt und bestückt werden

Platine einsetzen und festschrauben (4x M2,5 Schrauben, Platine)

 Platine mit 4xM2,5 Schrauben befestigen (Richtung beachten)







Y-Ventil herstellen (aus Aluminium Block 16x16x46mm)

Kabel an Leitungsdurchführung anlöten (Leitungsdurchführung, Kabel 40cm)

- ► 2x 40cm Kabel
- Nur 2 Kontakte werden benötigt
- Leitungsdurchführung anschrauben (Leitungsdurchführung, Alu Block)
 - ► Leitungsdurchführung in Alu Block schrauben

Kabel anlöten (Koaxialkabel, Alu Block inkl. Leitungsdurchführung, Reifenventil)

- ► 1x 40cm Koaxialkabel
- Koaxialkabel an Leitungsdurchführung anlöten und abdichten (nur 2 Kontakte werden benötigt siehe Punkt 9.)

Kabelverschraubung an Koaxialkabel anbringen











Kabelverschraubung in Gehäuse schrauben

Kabel anlöten (Kabel)

- ► 3x 3cm Kabel
- Micro USB an Platine anlöten
- Koaxialkabel an Platine anlöten ►
- Batterie an Platine anschließen (Polung beachten: Quadrat ist minus)

Dichtung anbringen (Dichtungspapier)

- ▶ Dichtungspapier passend zuschneiden
- Löcher vorstechen

Deckel anbringen (Deckel, 5x M2,5 Schrauben)

- Dichtungspapier zwischen Gehäuse und Deckel legen ►
- Deckel mit 5x M2,5 Schrauben befestigen ►

Gesamte Einheit an Felge anbringen (5x M6 Schrauben, 5x A6,4 Unterlagscheiben)

- ► Gewinde in Radschrauben schneiden
- ► Einheit mit 5x M6 Schrauben an Felge anbringen











Ventil an die Felge anbringen (Dichtung BLRG9-T, Mutter M10)

Mikrofon

- Die Polung des Mikrofons umkehren, dafür die Verbindung des ursprünglichen Minus-Pols mit dem Gehäuse unterbrechen und den ursprünglichen Plus-Pol mit dem Gehäuse verbinden.
- In der Abbildung wird das ursprüngliche Mikrofon (links) und das modifizierte Mikrofon (rechts) gezeigt

Mikrofon anbringen (Mikrofon, Dämmmaterial)

- Mikrofon anlöten (Gehäuse liegt an minus)
- ► Mikrofon an Felgeninnenseite mit Dämmmaterial festkleben





3 Software

Datenlogger und Inertialsensor

Damit die Installation der Software automatisch ablaufen kann, muss die SD-Karte für den Raspberry Pi mit einem selbst entwickelten Image analog zu einem normalen Raspian OS Image beschrieben werden. Das selbstentwickelte Image ist hier zu finden: <u>Link</u> (Link aktiv bis: 30.04.2018, Passwort: uba_anleitung). Alternativ kann ein neues selbstentwickeltes Image mit dem Skript "kernel_img_push-to-SDCard.sh", ebenfalls unter dem oben genannten Link verfügbar, unter Linux erstellt werden. Hierfür muss zunächst "qemu-user-static", "debootstrap", "curl", und "bc" installiert werden.

Um die Software auf den Raspberry Pi zu laden und zu installieren, muss dieser per Lan Kabel mit dem Internet verbunden sein (die Software wird automatisch von einem GIT heruntergeladen bzw. ist hier zu finden: <u>Link</u> (Link aktiv bis: 30.04.2018, Passwort: uba_anleitung)). Soll zusätzlich der Pi mit der Telemetrie gekoppelt und die Software auf dem Bluetooth-Modul der Platine installiert werden, muss die Bluetooth Antenne angeschlossen und der Pi mit der Telemetrie per UART verbunden werden (siehe Abbildung 30).

Die Credentials für den Access-Point und den Server können im Repository in der Datei "rpi_config.cfg" in den Abschnitten "WLAN" und "Samba" angepasst werden.

Abbildung 30: Installation des Pis und Kopplung mit der Telemetrie



Mikrofon und Telemetrie

Der ATtiny der Platine, der für die Aktivierung der Platine durch das Drehen der Fahrzeugräder zuständig ist, muss mit der "PowerManagement" Software geflasht werden. Des Weiteren muss die Firmware des Bluetooth Moduls auf der Platine aktualisiert werden. Die dafür benötigten Dateien und Anleitung befindet sich hier: (Link aktiv bis: 30.04.2018, Passwort: uba_anleitung): <u>Link</u>

Die Software des Bluetooth-Moduls wird automatisch während der Installation des Pis installiert.

4 Benutzung

Während der Datenaufzeichnung kann man sich mit dem Raspberry Pi per LAN verbinden, um die Aufzeichnung zu überwachen und ggfls. Daten zu sichern. Auf einem Windows PC eignen sich für die Verbindung die Programme "Putty" und "WinSCP". Die IP Adresse des Pis lautet 192.168.111.3, der Benutzername "pi" und das Passwort ist "pipi1234". Die Daten befinden sich im Ordner /home/pi/logging_data.