

Campus FreeCity – Reallabor zur Erforschung einer vernetzten Flotte modularer Roboterfahrzeug



Abschlussbericht

Übergeben durch die COMPREDICT GmbH

Zuwendungsempfänger: COMPREDICT GmbH	Förderkennzeichen: 45KI15A011
Projektleiter: Dr.-Ing. Rafael Fietzek	Tel.: +49 (0) 6151 3844614
Laufzeit des Vorhabens: von: 24.11.2021 bis: 31.10.2024	Fax: -
Berichtszeitraum des Vorhabens: von: 24.11.2021 bis: 31.10.2024	E-Mail: fietzek@compredict.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Abbildungsverzeichnis.....	1
1. Projektdarstellung.....	2
1. Projektbeschreibung und Zielsetzung.....	2
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an denen angeknüpft wurde.....	5
5. Aktueller Stand Wissenschaft und Technik.....	6
6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
2. Verwendung der Zuwendung im Einzelnen & erzielte Resultate.....	8
1. Übersicht des Projektverlaufes.....	8
2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	29
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	30
4. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens.....	30
5. Darstellung des fortgeschriebenen Datenmanagementplan.....	31
6. Darstellung der durchgeführten öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen.....	31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Radmotor von CityBots Traktoren.....	20
Abbildung 2: Lastkollektiv für Traktor1 - Motor.....	21
Abbildung 3: Batterie Kapazitätsabschätzung für Traktor 1.....	21
Abbildung 4: Batterie Kapazitätsabschätzung für Traktor 2.....	22
Abbildung 5: Von Links zu Recht, Fahrsituationen 1 bis 3.....	22
Abbildung 6: Radkoordinatensystem.....	23
Abbildung 7: Reifenenergie für Traktor 1.....	24
Abbildung 8: Reifenenergie für Traktor 2.....	24
Abbildung 9: Stand der Motorschädigung in Dezember 2023.....	25
Abbildung 10: Antriebsstrangverschleiß Traktor 1.....	25
Abbildung 11: Antriebsstrangverschleiß Traktor 2.....	26
Abbildung 12: Batterieverschleiß.....	26
Abbildung 13: Detail Batterieverschleiß Traktor 1.....	27
Abbildung 14: Reifenverschleiß Traktor1 (Zeit).....	28
Abbildung 15: Reifenverschleiß Traktor1 (Laufleistung).....	28

1. Projektdarstellung

1. Projektbeschreibung und Zielsetzung

Der urbane Verkehr der Gegenwart ist durch hohe Verkehrsdichte, erhebliche Emissionen und ineffiziente Nutzung von Transportkapazitäten gekennzeichnet. Konventionelle Ansätze zur Elektrifizierung und Automatisierung einzelner Fahrzeuge reichen nicht aus, um diese Herausforderungen zu bewältigen. Vor diesem Hintergrund bietet das "CityBot"-Konzept der EDAG Group einen ganzheitlichen Lösungsansatz zur nachhaltigen Transformation urbaner Mobilität.

Das Konzept sieht eine vollständig vernetzte, modulare Fahrzeugflotte vor, die als zentrale Mobilitätsplattform für Güter- und Personentransport sowie kommunale Dienstleistungen fungiert. Diese Flotte wird durch ein intelligentes Leitsystem gesteuert, das sowohl eine optimale Ressourcennutzung als auch eine datengetriebene Effizienzsteigerung ermöglicht. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle "Avatar" erleichtert die Interaktion mit Fußgängern und Radfahrern und erhöht somit die Akzeptanz im städtischen Raum. Durch die Einführung des CityBot-Ökosystems soll die innerstädtische Fahrzeugzahl auf etwa 20 % des heutigen Niveaus reduziert werden, was zu einer erheblichen Verbesserung der Lebensqualität führt.

Das Projekt verfolgt das Ziel, das CityBot-Ökosystem als innovatives, nachhaltiges und wirtschaftlich tragfähiges Mobilitätskonzept zu entwickeln und zu erproben. Dafür wird ein interdisziplinärer Forschungsansatz gewählt, der technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Aspekte integriert.

Die Hauptziele des Projekts sind:

1. **Entwicklung eines vernetzten Mobilitätsökosystems:** Aufbau einer automatisierten, modularen Fahrzeugflotte, die verschiedene Transportaufgaben in der Stadt effizient übernimmt.
2. **Optimierung urbaner Mobilität:** Reduktion des Flächenverbrauchs, Senkung von Emissionen und Entlastung der städtischen Verkehrsinfrastruktur durch flexible Einsatzmöglichkeiten der CityBots.
3. **Reallabor zur Validierung:** Implementierung eines Reallabors zur praxisnahen Untersuchung der CityBot-Technologien, inklusive Fahrzeugprototypen, Leitsystem und Nutzerinteraktion.
4. **Akzeptanz und Integration in bestehende Strukturen:** Erforschung der gesellschaftlichen, rechtlichen und wirtschaftlichen Implikationen sowie Sicherstellung der Nutzerfreundlichkeit.
5. **Technologische Innovationen:** Entwicklung neuer Ansätze für teleoperiertes und autonomes Fahren, Mensch-Maschine-Interaktion, energieeffiziente KI, Predictive Maintenance und Sektorkopplung.

Das Projekt wird in zwei Phasen umgesetzt: Die erste Phase konzentriert sich auf die Entwicklung und den Aufbau der zentralen Systemkomponenten, während die zweite

Phase die Erprobung und Validierung im Reallabor umfasst. Langfristig soll das CityBot-Ökosystem als skalierbare Lösung für nachhaltige urbane Mobilität etabliert werden.

COMPREDICT konzentriert sich auf die Entwicklung und Implementierung virtueller Sensoren zur Optimierung der Fahrzeugnutzung und -wartung. Mithilfe intelligenter Algorithmen werden Zustandsanalysen und vorausschauende Wartungsstrategien ermöglicht, um die Betriebskosten zu senken und die Lebensdauer der CityBots zu maximieren. Durch datengetriebene Analysen trägt COMPREDICT maßgeblich zur Effizienzsteigerung und Nachhaltigkeit des CityBot-Ökosystems bei.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projektkonsortium bestand aus wissenschaftlichen Partnern und Unternehmen, die alle notwendigen Kompetenzen für das Verbundvorhaben abdeckten (Tabelle 1).

Partner	Abkürzung
House of Logistics & Mobility GmbH	HOLM
EDAG Engineering GmbH	EDAG
EintrachtTech GmbH	EintrachtTech
T-Systems International GmbH	T-Systems
COMPREDICT GmbH	COMPREDICT
DEKRA Automobil GmbH	DEKRA
Hochschule Fulda	HSFD
Prof. Dr. Michael Huth, Fachbereich Wirtschaft, Schwerpunkt Logistik und Supply Chain Management	HSFD (Huth)
Prof. Dr. Michael Zohner, Fachbereich Angewandte Informatik	HSFD (Zohner)
Prof. Dr.-Ing. Martin Kumm, Prof. Dr. habil. Alexander Gepperth, Fachbereich Angewandte Informatik	HSFD (Kumm)
Prof. Dr. habil. Jan-Torsten Milde, Fachbereich Angewandte Informatik	HSFD (Milde)
Technische Universität Darmstadt	TUDa
Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau	IMS (TUDa)
Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik	BST (TUDa)
Institut für Arbeitswissenschaft	IAD (TUDa)
Institut IWAR, Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft	SuR (TUDa)
Fachgebiet Wirtschaftsinformatik – Software und Digital Business	WINF (TUDa)

Tabelle 1: Beteiligte Partner und Abkürzungen

Zur Adressierung ausgewählter Forschungsschwerpunkte rund um die Implementierung eines CityBot-Ökosystems in der Innenstadt wurden wissenschaftliche Partner folgender Disziplinen im Verbundprojekt involviert (siehe Abbildung 1):

- Betriebswirtschaft und Logistik

- Informatik und Wirtschaftsinformatik
- Maschinenbau, Arbeits- und Sozialwissenschaft
- Verkehrswissenschaften
- Bau- und Ingenieurwissenschaften
- Ökologie und Ressourcenwirtschaft

Hochschule Fulda
University of Applied Sciences 

Supply-Chain-Integration (Prof. Huth): Modellierung der Supply Chain, Entwicklung von Planungsalgorithmen.

IT-Sicherheit (Prof. Zohner): Sicherheitsanalyse, Entwicklung neuer Sicherheitsmechanismen.

Energieeffiziente KI (Prof. Kumm, Prof. Geppert): Energieeffiziente KI in eingebetteten Systemen.

Mensch-Maschine-Interaktion (Prof. Milde): Multimodales, auf Sprache und Gestik basierendes Interaktionskonzept für den CityBot.

 TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT  MASCHINENBAU  Institut für Autonomie und Substraktik 

Optimierter Antrieb (IMS): Identifikation weiterführender Effizienzpotentiale des CityBots in den Bereichen Antriebsstrang, Längsdynamikführung und Sektorkopplung.

Robuster Betrieb (BST): Entwicklung Capacity Traffic Management System (CMTS) inkl. Störfallprogramme.

Mensch-Maschine-Interaktion (IAD): HMIs für die Interaktion zwischen CityBot und Menschen wie Fußgänger*innen, Arbeitspersonen und Operator*innen in der Leitzentrale.

Ökologische Bewertung (SuR): Ökologische Bewertung, Ermittlung von Umweltvorteilen des Ökosystems.

Akzeptanz und Vertrauen (WINF): Analyse von Akzeptanzkriterien und Vertrauensaspekten aus Nutzersicht.

Abbildung 1: Übersicht Wissenschaftspartner: Schwerpunkt Teilvorhaben

Neben den Forschungsschwerpunkten der angebotenen wissenschaftlichen Institute und Fachbereiche der Hochschule Fulda und der Technischen Universität Darmstadt (Abbildung 1) wurden industrielle Fragestellungen durch die Wirtschaftspartner EDAG (CityBot-Ökosystem-Gesamtperspektive), EintrachtTech (Infrastruktur Reallabor; Use Cases und Nutzeranforderungen), T-Systems (Teleoperation und technische Aufsicht), COMPREDICT (Virtuelle Sensoren) und DEKRA (Zulassung Laborbetrieb Campus FreeCity, Systemanforderungen und Sicherheitskonzept) adressiert. Der Verbundpartner HOLM (Gesamtkoordination; Bürgerdialog; Ethische und andere Implikationen) übernahm die Konsortialführerschaft und die Koordination gesellschaftsrelevanter Themenstellungen (Abbildung 2).

	<p>Konsortialführung und ELSI-Begleitung: Projektmanagement, Vernetzung, Öffentlichkeitsarbeit, Bürgerbeteiligung, Begleitung zu ethischen, rechtlichen und sozialen Implikationen (ELSI).</p>
	<p>Komplettes Ökosystem: Entwicklung der EDAG CityBots und ihrer Module, Entwicklung des Leitsystems, Einrichtung des Operation Centers und der Maintenance Area.</p>
	<p>Infrastruktur und Use Cases: Bereitstellung der räumlichen Infrastruktur des Reallabors, Erarbeiten der Use Cases und User Journeys.</p>
	<p>Teleoperation und technische Aufsicht: Erforschung von Technikansätzen sowie Prozess- und Betriebsabläufen für Teleoperation und technische Aufsicht automatisierter Fahrzeuge.</p>
	<p>Virtuelle Sensoren: Messungen für das Training von virtuellen Sensoren und die Vorhersage von Komponentenausfällen.</p>
	<p>Sicherheit und Zulassung: Gewährleistung der Einhaltung von Sicherheitsstandards, Entwicklung und Durchführung von Prüfverfahren für den sicheren Betrieb.</p>

Abbildung 2: Übersicht Wirtschaftspartner: Schwerpunkt Teilvorhaben

Für weiterführende Informationen zu den einzelnen Verbundpartnern sei auf die Teilvorhaben der Partner und den zusammenfassenden Schlussbericht zum Verbundprojekt

Campus FreeCity verwiesen.

COMPREDICT entwickelt in dem vom BMWi geförderten Forschungsprojekt DE4LoRa auch virtuelle Sensoren für den Antriebsstrang eines Hybridfahrzeugs. Da dieses Fahrzeug ein gewöhnliches Nutzungsprofil eines von Privatpersonen genutzten Mittelklassefahrzeugs aufweist, unterscheidet sich dieses fundamental von den Nutzungsprofilen der CityBots. In dem Zusammenhang aufgrund der Modularität, der verschiedenen Einsatzszenarien und dem kontinuierlichen Einsatz der CityBots ergeben sich weitreichendere Anforderungen an die virtuellen Sensoren und die Predictive Maintenance Algorithmen, wie beispielsweise Robustheit und Generalisierbarkeit. Diese müssen unter allen Modulkombinationen und Einsatzbedingungen präzise Werte und Vorhersagen bereitstellen. Das wird der Hauptfokus dieses Projekts.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde entsprechend den Vorgaben des GVB durchgeführt, einschließlich einer kostenneutralen Verlängerung zur optimalen Umsetzung der Projektziele. In den ersten sieben Monaten des Projekts wurden Betriebs- und Auslegungsdaten analysiert sowie das Simulationsmodell erweitert.

Von Monat 7 bis 21 lag der Fokus auf der Anpassung und Implementierung der Datenlogger. Diese Phase erstreckte sich über einen längeren Zeitraum, um den bestehenden Produktionseinschränkungen gerecht zu werden. Parallel dazu wurde von Monat 7 bis 27 der Aufbau der Daten- und KI-Pipeline sowie das Training virtueller Sensoren realisiert.

Ab Monat 22 bis zum Projektende konzentrierte sich die Arbeit auf die Entwicklung KI-basierter Schadensmodelle und die kontinuierliche Überwachung von Komponenten.

Der Grundstein zu virtuellen Sensoren wurde in Stéphane Foulards Doktorarbeit (Foulard, 2015) gelegt. Dort wurden erste Ansätze der Technologie am Beispiel von Getrieben untersucht. Zusätzlich wurden Prädiktive Maintenance Aspekte in der Doktorarbeit bereits erforscht, indem die Restlebensdauern der untersuchten Getriebe berechnet wurden. Zusammenhängende Konferenzbeiträge (Foulard et al., 2013a; Foulard et al., 2013b; Foulard et al., 2014; Foulard et al., 2015; Foulard et al., 2016a; Foulard et al., 2016b; Foulard et al., 2016c; Foulard et al., 2017; Esser et al., 2018; Foulard et al., 2019) dokumentieren die kontinuierliche Weiterentwicklung der virtuellen Sensoren und die zusammenhängenden Algorithmen für Prädiktive Maintenance und nachhaltige Fahrzeugentwicklung.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an denen angeknüpft wurde

Die Grundlagen für die Entwicklung virtueller Sensoren wurden in der Doktorarbeit von Stéphane Foulard (Foulard, 2015) gelegt. Diese Arbeit befasste sich mit den ersten Ansätzen zur Nutzung virtueller Sensoren, insbesondere am Beispiel von Getrieben, und unter-

suchte bereits Predictive Maintenance Konzepte, indem die Restlebensdauer der Komponenten berechnet wurde. Die kontinuierliche Weiterentwicklung dieser Technologie wurde durch mehrere wissenschaftliche Publikationen begleitet (Foulard et al., 2013a; Foulard et al., 2013b; Foulard et al., 2014; Foulard et al., 2015; Foulard et al., 2016a; Foulard et al., 2016b; Foulard et al., 2016c; Foulard et al., 2017; Esser et al., 2018; Foulard et al., 2019). Diese Arbeiten dokumentieren die Weiterentwicklung der Algorithmen zur Zustandsüberwachung, zur lebensdauerbasierten Wartungsstrategie sowie zur nachhaltigen Fahrzeugentwicklung.

Ein weiterer wissenschaftlicher Bezugspunkt für das *Campus Free City* Projekt ist das BMWi-geförderte Forschungsprojekt DE4LoRa, in dem COMPREDICT ebenfalls virtuelle Sensoren für den Antriebsstrang eines Hybridfahrzeugs entwickelt. Während dieses Projekt auf klassische Nutzungsprofile von privat genutzten Mittelklassefahrzeugen ausgerichtet ist, stellt das *Campus Free City* Projekt eine völlig neue Herausforderung dar: Die modulare Architektur, variierenden Einsatzszenarien und der kontinuierliche Betrieb der CityBots erfordern eine deutlich höhere Robustheit und Generalisierbarkeit der virtuellen Sensoren und Predictive Maintenance-Algorithmen.

Die wissenschaftliche Basis für die Entwicklung der im Projekt eingesetzten Algorithmen stützt sich auf Maschinelles Lernen, Datenfusion und numerische Modellierung, die in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen haben. Die verwendeten Verfahren wurden anhand existierender wissenschaftlicher Literatur weiterentwickelt und an die spezifischen Anforderungen von modularen, autonomen Fahrzeugplattformen angepasst.

Zur Durchführung des Vorhabens wurden bestehende Softwarebibliotheken und Datenverarbeitungsmethoden eingesetzt, insbesondere für die Echtzeit-Datenanalyse, Signalverarbeitung und maschinelles Lernen. Die verwendeten Informationsquellen und Dokumentationsdienste umfassten sowohl wissenschaftliche Datenbanken als auch technische Standards und branchenspezifische Veröffentlichungen aus der Automobilindustrie. Durch den Rückgriff auf diese wissenschaftlichen und technischen Grundlagen konnte das Projekt die bestehenden Konzepte weiterentwickeln und für die Anforderungen von autonomen, modularen und vernetzten Fahrzeugflotten optimieren. Damit wurde ein wesentlicher Beitrag zur Weiterentwicklung und Praxistauglichkeit virtueller Sensoren in der zukünftigen Mobilität geleistet.

5. Aktueller Stand Wissenschaft und Technik

Virtuelle Sensoren gewinnen zunehmend an Bedeutung, insbesondere durch die steigende Rechenkapazität moderner Fahrzeuge. Diese Technologie ermöglicht eine kosteneffiziente und softwarebasierte Zustandsüberwachung ohne zusätzliche physische Sensoren, was sie besonders attraktiv für die Automobilindustrie macht.

Ein zentrales Thema ist die Vorhersage der Antriebsbatterie-Degradation, die durch neue EU-Vorgaben an Bedeutung gewinnt. Fahrzeughersteller sind verpflichtet, den Zustand der Batterie (State of Health, SOH) zu schätzen und zu kommunizieren. In den letzten Jahren haben sich Algorithmen zur Batteriezu-

standsprognose erheblich weiterentwickelt, wodurch genauere und verlässlichere Vorhersagen möglich sind.

Im Bereich des Antriebsstrangverschleißes gibt es bisher weniger Marktdruck, da die meisten Komponenten nicht direkt verschleifen. Dennoch zeigen Diskussionen mit OEMs, dass virtuelle Sensoren auch hier Potenzial haben, insbesondere zur Optimierung von Regelstrategien für den Antriebsstrang. Die Technologie kann dazu beitragen, Belastungen besser zu erkennen und präventive Maßnahmen zur Systemschonung zu entwickeln.

Der Reifenverschleiß hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen, da Reifen eine zentrale Verschleißkomponente darstellen. OEMs sehen hier eine strategische Möglichkeit, den Umsatz im After-Sales-Geschäft zu steigern. Dennoch steckt die Technologie für virtuelle Reifenverschleißsensoren noch in den Kinderschuhen und ist derzeit nicht in der Großserie etabliert. Ein Vorreiter in diesem Bereich ist COMPREDICT, das mit der Implementierung eines virtuellen Sensorsystems für Renault eine führende Marktposition eingenommen hat.

Insgesamt zeigen diese Entwicklungen, dass virtuelle Sensoren ein wachsendes Feld mit erheblichen Potenzialen für Effizienzsteigerung, Kostensenkung und Nachhaltigkeit in der Fahrzeugtechnik darstellen.

6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Laufe des Projektes wurde eine Zusammenarbeit mit unseren assoziierten Projektpartnern **DPD Deutschland GmbH** (u.a. Bereitstellung von Logistikkdaten für die Stadt Frankfurt am Main, Use Case Entwicklung aus einer professionellen Anwenderperspektive für den Bereich Logistik) und der **Mainova Aktiengesellschaft** (u.a. Bereitstellung von Sensordaten zur Messung von Bodenfeuchte für die CityBots, Standardisierung von [FL-WARE](#)¹ Komponenten für Smart City Use Cases im CFC-Umfeld) durchgeführt.² Zudem sind wir eine assoziierte Partnerschaft mit der **FRANKFURTER ENTSORGUNG- UND SERVICE GMBH (FES)** bereits zum Projektbeginn eingegangen (Unterstützung der Use Case Entwicklung aus einer professionellen Anwenderperspektive für öffentliche Aufgaben in der Innenstadt).

Im Rahmen des Projekts fand ein intensiver Austausch mit der Technischen Universität Darmstadt statt, insbesondere mit dem Institut für Mechatronische Systeme (IMS), um relevante Betriebs- und Sensordaten für die Forschung bereitzustellen. Zudem erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit EDAG zur Implementierung des Datenloggers in den City-Bot, um die Echtzeit-Datenerfassung zu optimieren.

Darüber hinaus nahmen die Projektbeteiligten an ELSI-Workshops teil, um ethische, rechtliche und soziale Implikationen der neuen Mobilitätslösung zu diskutieren. Die Zusammenarbeit wurde durch die Teilnahme an allen Konsortialtreffen und regelmäßigen Abstimmungsterminen sichergestellt, wodurch eine effektive Koordination zwischen den verschiedenen Partnern gewährleistet wurde.

2. Verwendung der Zuwendung im Einzelnen & erzielte Resultate

1. Übersicht des Projektverlaufes

1. Darstellung der erzielten Ergebnisse

1. Eigene Arbeitspakete

Arbeitspaket 5.1: Analyse Betriebs- und Auslegungsdaten + Erweiterung Simulationsmodell

Ziele:

- Benötigten Eingangsgrößen für Antriebsmomente-, Reifenkräfte- und Batterieverschleißrekonstruktion zu identifizieren

Verfügbaren Daten

Daten aus unterschiedlichen Testfahrten, als roh CAN-Bus Daten von EDAG bekommen:

- Beispieldaten gefahren in dem EDAG Gelände – 08.03.2022
- Testfahrt in dem EDAG Gelände – 23.03.2022
 - o „Bergfahrt_Drehung_Talfahrt“
 - o „Werkstatt_Teich“
 - o „Rundfahrt“
- Testfahrt in dem Deutsche Bank Park – 29.03.2022
 - o „Haupttribüne_Eiche“
 - o „Eiche_Rondell“
 - o „Rondell_Mülldeponie“
 - o „Mülldeponie_Rondell“
 - o „Rondell_Stadionvorplatz“
 - o „Gegentribüne_unten“
 - o „Grünschnitt“
 - o „Gegentribüne_oben“
 - o „Stadiondurchfahrt“
 - o „Beachweg_zu_Garage“
 - o „Garage_überBeachweg_Rondell“

Daten Import und Vorbereitung

Daten wurden als Rohdaten von EDAG kommuniziert. Die Daten sollen erst in physikalischen Signalen dank einer DBC-Datei umgewandelt werden. Die Signale werden auch umbenannt, um eine eindeutige und gemeinsame Konvention mit dem IMS zu folgen.

Edag Name	Frame name	CP Name	Description	Unit
acc_brick_x	acc_brick_msg1	VehAcc_X_g	Longitudinal acceleration	g
acc_brick_y	acc_brick_msg1	VehAcc_Y_g	Lateral acceleration	g
typk_brick_temp	acc_brick_msg2	EnvTemp	Environment temperature	°C
acc_brick_z	acc_brick_msg2	VehAcc_Z_g	Vertical acceleration	g
AccelerationX	Acceleration	VehAcc_X	Longitudinal acceleration	m/s ²
AccelerationY	Acceleration	VehAcc_Y	Lateral acceleration	m/s ²

AccelerationZ	Acceleration	VehAcc_Z	Vertical acceleration	m/s ²
AngularRateX	AngularRate	RollRate	Roll rate	°/s
AngularRateY	AngularRate	PitchRate	Pitch rate	°/s
AngularRateZ	AngularRate	YawRate	Yaw rate	°/s
baro_brick_hoehe	ba-ro_brick_druck_hoehe	EnvAlt	Altitude	m
baro_brick_druck	ba-ro_brick_druck_hoehe	EnvPrs	Barometric pressure	hPa
baro_brick_temp	ba-ro_brick_temp	EnvTemp_Baro	Environment temperature	°C
BMSVCU_02_iCurr	BMSVCU_02	BatCur	Battery current	A
BMSVCU_02_uCurr	BMSVCU_02	BatVolt	Battery voltage	V
BMSVCU_07_CapacityCurr	BMSVCU_07	BatCap_Soc	State of Charge	Ah
BMSVCU_07_CapacityInit	BMSVCU_07	BatCap_Init	Initial battery capacity	Ah
BMSVCU_07_CapacityMax	BMSVCU_07	BatCap_Max	Maximum total battery capacity with ageing effects	Ah
BMSVCU_07_CurrEnergyContent	BMSVCU_07	BatEngy	Current energy content	Wh
BMSVCU_07_RiCurr	BMSVCU_07	BatRes_Int	Internal resistance	mOhm
BMSVCU_07_RiInit	BMSVCU_07	BatRes_IntInit	Initial internal resistance	mOhm
current_max_command	control_command_hl	StrCur_Rl_Tgt		
position_command	control_command_hl	StrPos_Rl_Tgt	Target position of Rl steering actuator	
speed_command	control_command_hl	StrSpd_Rl_Tgt		
current_max_command	control_command_hr	StrCur_Rr_Tgt	Target position of Rr steering actuator	
speed_command	control_command_hr	StrSpd_Rr_Tgt		
position_command	control_command_hr	StrPos_Rr_Tgt	Target position of Rr steering actuator	
current_max_command	control_command_vl	StrCur_Fl_Tgt		

position_command	control_command_vl	StrPos_Fl_Tgt	Target position of Fl steering actuator	
speed_command	control_command_vl	StrSpd_Fl_Tgt		
current_max_command	control_command_vr	StrCur_Fr_Tgt		
speed_command	control_command_vr	StrSpd_Fr_Tgt		
position_command	control_command_vr	StrPos_Fr_Tgt	Position of Fr steering actuator	
gps_brick_latitude	gps_brick_coordinates	GpsLat	Latitude	°
gps_brick_longitude	gps_brick_coordinates	GpsLong	Longitude	°
gps_brick_hoehe	gps_brick_hoehe_speed	GpsAlt	Altitude	m
gps_brick_speed	gps_brick_hoehe_speed	GpsSpd	GPS speed	km/h
Vd	Inv1_DiagMsg	InvVolt_Fl_Vd	Inverter 1 Vd	
Vq	Inv1_DiagMsg	InvVolt_Fl_Vq	Inverter 1 Vq	
Rotor_angle	Inv1_DiagMsg	MotAng_Fl	Motor 1 rotor angle	
Id	Inv1_fast_status	InvCur_Fl_Id	Inverter 1 Id	A
Iq	Inv1_fast_status	InvCur_Fl_Iq	Inverter 1 Iq	A
Speed	Inv1_fast_status	MotSpd_Fl	Motor 1 speed	rpm
DC_current	Inv1_medium_status	InvCur_Fl	Inverter 1 Dc current	Ah
DC_voltage	Inv1_medium_status	InvVolt_Fl	Inverter 1 DC Voltage	V
Bus_capacitor_temperature	Inv1_slow_status	Inv-Temp_Fl_BusCapacitor	Inverter 1 Bus capacitor temperature	°C
Power_bridge_temperature	Inv1_slow_status	Inv-Temp_Fl_PowerBridge	Inverter 1 Bridge teperature	°C
Motor_temperature	Inv1_slow_status	MotTemp_Fl	Motor 1 temperature	°C
Vd	Inv2_DiagMsg	InvVolt_Fr_Vd	Inverter 2 Vd	
Vq	Inv2_DiagMsg	InvVolt_Fr_Vq	Inverter 2 Vq	
Rotor_angle	Inv2_DiagMsg	MotAng_Fr	Motor 2 rotor angle	
Id	Inv2_fast_status	InvCur_Fr_Id	Inverter 2 Id	A
Iq	Inv2_fast_status	InvCur_Fr_Iq	Inverter 2 Iq	A

Speed	Inv2_fast_status	MotSpd_Fr	Motor 2 speed	rpm
DC_current	Inv2_medium_status	InvCur_Fr	Inverter 2 DC current	Ah
DC_voltage	Inv2_medium_status	InvVolt_Fr	Inverter 2 DC Voltage	V
Bus_capacitor_temperature	Inv2_slow_status	Inv-Temp_Fr_BusCapacitor	Inverter 2 Bus capacitor temperature	°C
Power_bridge_temperature	Inv2_slow_status	Inv-Temp_Fr_PowerBridge	Inverter 2 Bridge teperature	°C
Motor_temperature	Inv2_slow_status	MotTemp_Fr	Motor 2 temperature	°C
Vd	Inv3_DiagMsg	InvVolt_RI_Vd	Inverter 3 Vd	
Vq	Inv3_DiagMsg	InvVolt_RI_Vq	Inverter 3 Vq	
Rotor_angle	Inv3_DiagMsg	MotAng_RI	Motor 3 rotor angle	
Id	Inv3_fast_status	InvCur_RI_Id	Inverter 3 Id	A
Iq	Inv3_fast_status	InvCur_RI_Iq	Inverter 3 Iq	A
Speed	Inv3_fast_status	MotSpd_RI	Motor 3 speed	rpm
DC_current	Inv3_medium_status	InvCur_RI	Inverter 3 DC current	Ah
DC_voltage	Inv3_medium_status	InvVolt_RI	Inverter 3 DC Voltage	V
Bus_capacitor_temperature	Inv3_slow_status	Inv-Temp_RI_BusCapacitor	Inverter 3 Bus capacitor temperature	°C
Power_bridge_temperature	Inv3_slow_status	Inv-Temp_RI_PowerBridge	Inverter 3 Bridge teperature	°C
Motor_temperature	Inv3_slow_status	MotTemp_RI	Motor 3 temperature	°C
Vd	Inv4_DiagMsg	InvVolt_Rr_Vd	Inverter 4 Vd	
Vq	Inv4_DiagMsg	InvVolt_Rr_Vq	Inverter 4 Vq	
Rotor_angle	Inv4_DiagMsg	MotAng_Rr	Motor 4 rotor angle	
Id	Inv4_fast_status	InvCur_Rr_Id	Inverter 4 Id	A
Iq	Inv4_fast_status	InvCur_Rr_Iq	Inverter 4 Iq	A
Speed	Inv4_fast_status	MotSpd_Rr	Motor 4 speed	rpm
DC_current	Inv4_medium_status	InvCur_Rr	Inverter 4 DC current	Ah
DC_voltage	Inv4_medium_status	InvVolt_Rr	Inverter 4 DC Voltage	V
Bus_capacitor_temperature	Inv4_slow_status	Inv-Temp_Rr_BusCapacitor	Inverter 4 Bus capacitor temperature	°C
Power_bridge_temperature	Inv4_slow_status	Inv-Temp_Rr_Power	Inverter 4 Bridge teperature	°C

Bridge				
Motor_temperature	Inv4_slow_status	MotTemp_Rr	Motor 4 temperature	°C
ahrsYaw	SlopeSensorInfo	YawRate2	Yaw angle	°
KalmanYaw	SlopeSensorInfo	YawRate_Filter	Yaw angle	°
current_status	status_hl	StrCur_Rl	Current Rl steering actuator	A
position_status	status_hl	StrPos_Rl	Position of Rl steering actuator	
current_status	status_hr	StrCur_Rr	Current Rr steering actuator	A
position_status	status_hr	StrPos_Rr	Position of Rr steering actuator	
position_status	status_vl	StrPos_Fl	Current Fl steering actuator	A
current_status	status_vl	StrCur_Fl	Position of Fl steering actuator	
current_status	status_vr	StrCur_Fr	Current Fr steering actuator	A
position_status	status_vr	StrPos_Fr	Position of Fr steering actuator	

Die Daten wurden auch erweitert und zusätzlichen Signale werden berechnet:

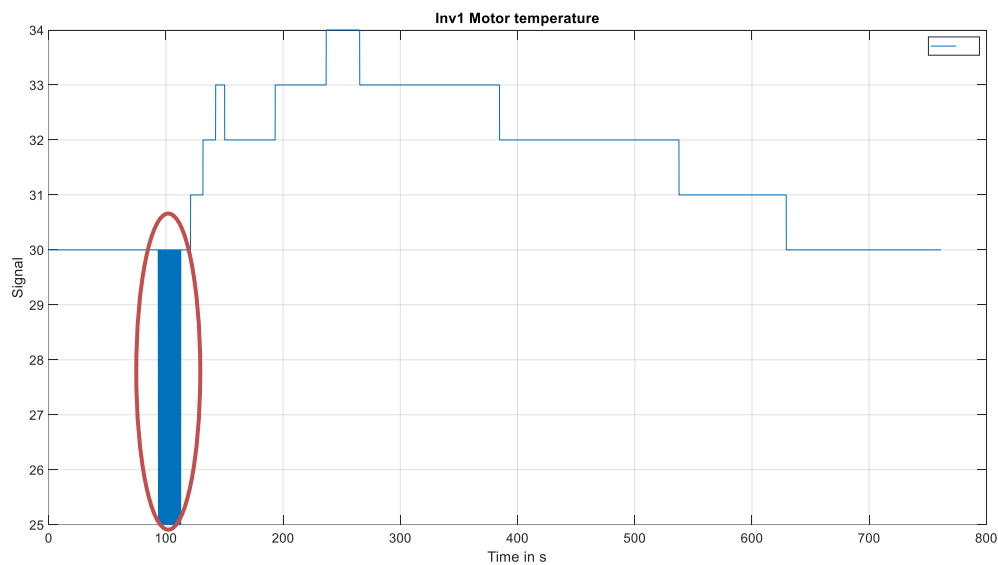
- Radgeschwindigkeiten (für die 4 Rädern), in km/h mit der Annahme der Reifenradius ($R = 0,3m$) aus der Motordrehzahl
- Lenkwinkel (für die 4 Rädern) auf Basis der Aktuator Position und ein Kennfeld gegeben bei EDAG

Datenanalyse

Ziel diese Analyse ist der Datenqualität abzuschätzen, um die nutzbaren Features für die zukünftigen Virtuellen Sensoren zu identifizieren.

CAN-Bus Fehler

Ein Paar Messfehler wurden bei dem ersten Datenset wegen eines Signalverlusts (z.B. zwischen 90 und 112s) erkannt. Solche Fehler sollen in der Zukunft nicht mehr auftauchen.



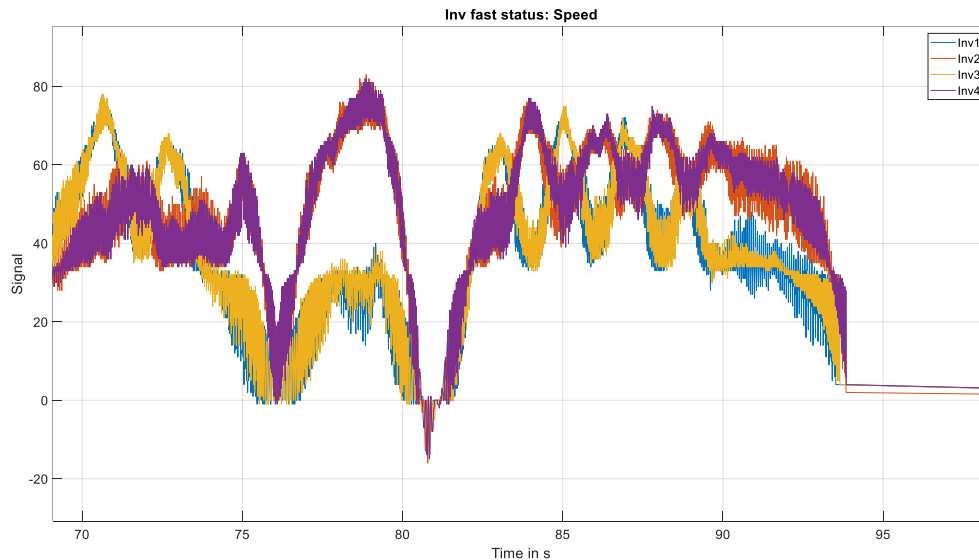
Wichtige Anmerkung:

Die analysierten Daten wurden auf dem Technikträger geloggt. Komponente wie die Batterie oder

die Lenkaktuatoren werden zukünftig geändert. Obwohl ähnliche Informationen weiterhin verfügbar sein sollen, die Signale sind aktuell nicht verfügbar und können deswegen nicht geprüft werden.

Motorengeschwindigkeit

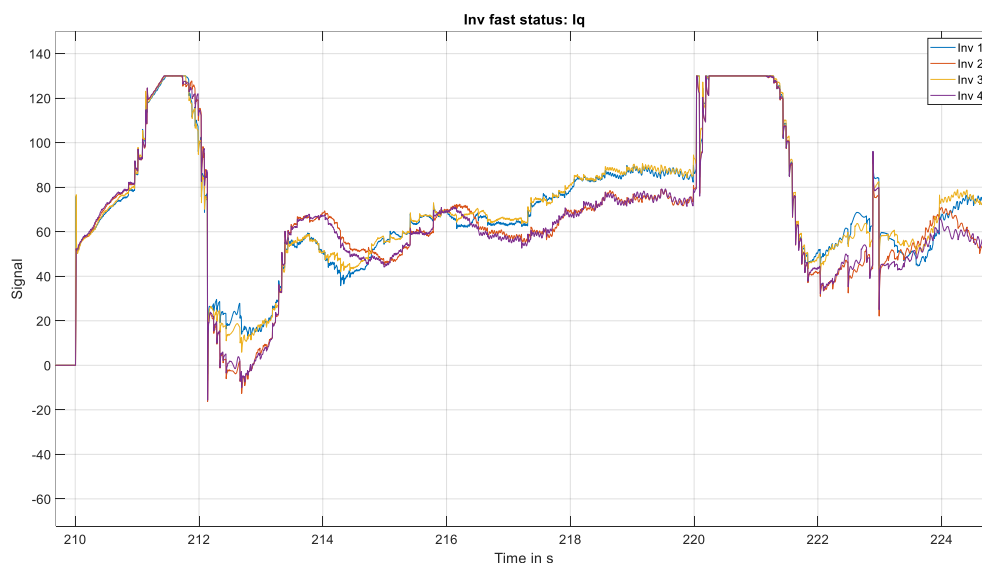
Die Inverter liefern ein Motorengeschwindigkeitssignal in rpm, leider ist dieses Signal verrauscht. Eine Rückmeldung von ELAPHE (Inverter und Motorhersteller) bestätigt, dass die Qualität leider so begrenzt ist.



Motor-Drehmoment

Kein direktes Drehmomentsignal ist verfügbar. Die Inverter liefern aber eine Strominformation, die zu dem Moment korreliert ist. Das Drehmoment pro Rad wird dann mit Hilfe eines Kennfelds berechnet.

Die Iq Ströme werden von dem Inverter bei 130A begrenzt.

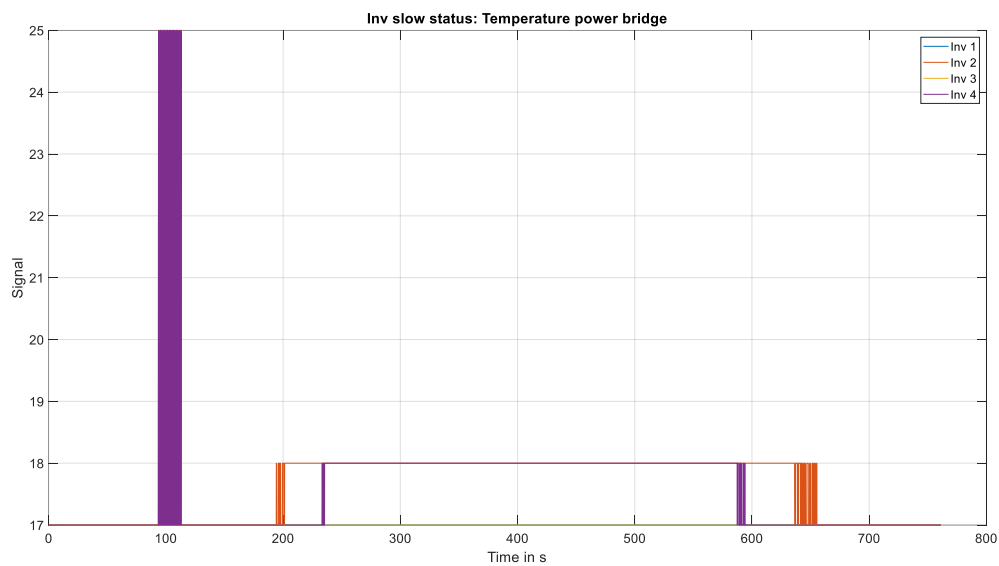


Motorentemperatur

Die Temperatur für die Motoren 3 und 4 sind nicht verfügbar und die Signale konstant gleich 0 auf dem CAN gegeben. Diese Information ist aber nicht notwendig für COMPREDICT.

Temperature power bridge und Bus capacitor

Die Signale weisen keine realistischen Werte auf, sind aber sind nicht notwendig für COMPREDICT.

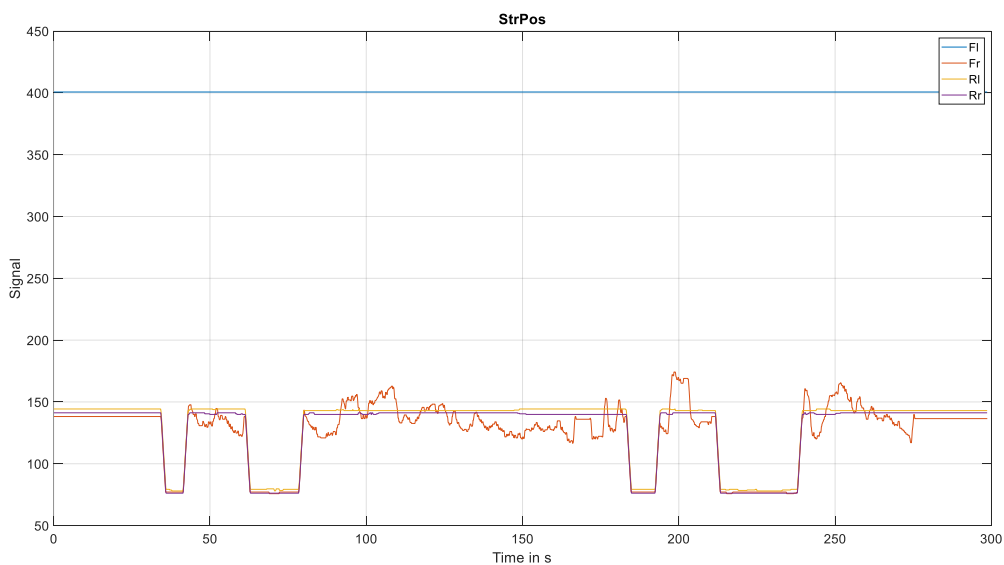


Position des Lenkaktuator

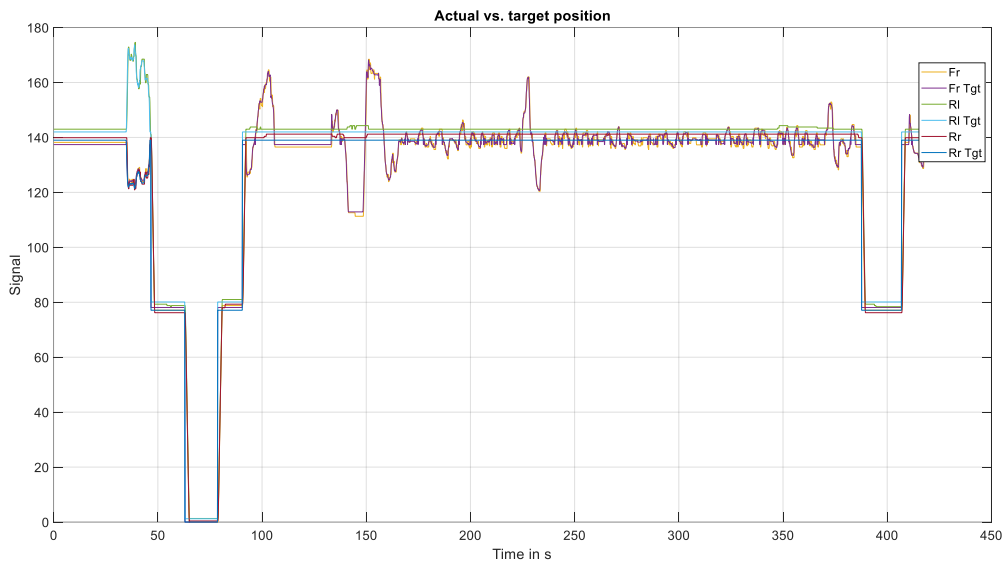
Anmerkung: Komponente und Signale werden zukünftig anders sein.

Die Stelle der Lenkaktuator wird in ein Lenkwinkel mithilfe eines Kennfeldes von EDAG umgewandelt.

Bei manchen Fahrten ist das Signal für vorne Links fehlerhaft.



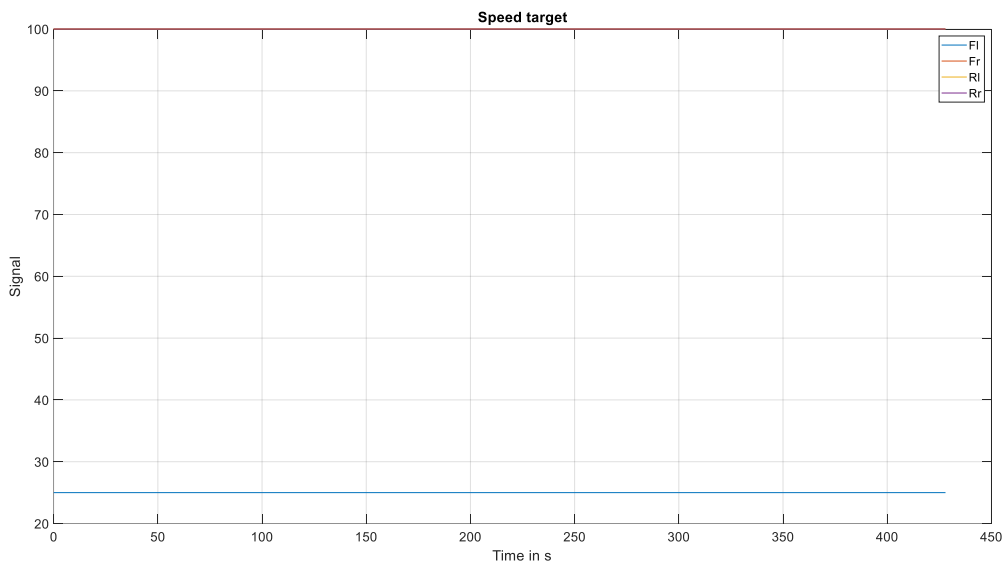
Der Sollwert und die tatsächliche Position sind sehr ähnlich. Die tatsächliche Position wird später benutzt.



Lenkaktor-Geschwindigkeit

Anmerkung: Komponente und Signale werden zukünftig anders sein.

Die Geschwindigkeit der Lenkaktuatoren ist nicht verfügbar. Kein tatsächlicher Wert ist definiert und die Zielwerte sind fehlerhaft (konstant gleich 100 für VR, HL, HR).

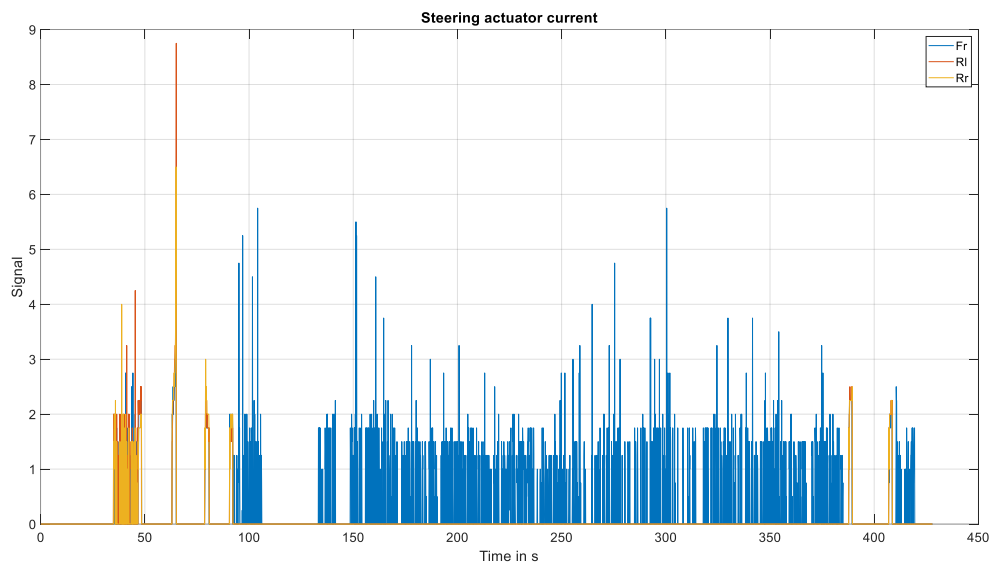


Lenkaktor-Strom

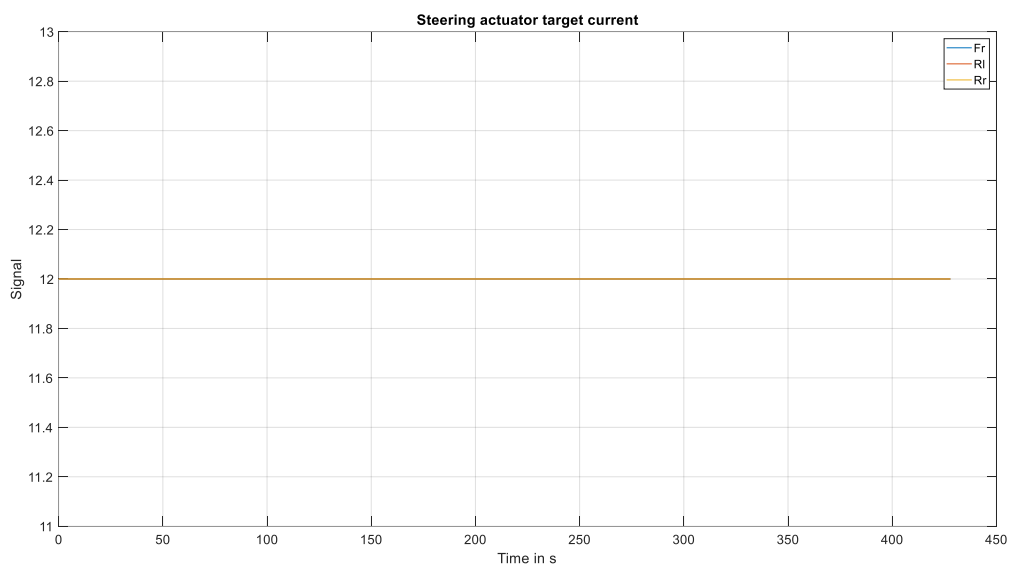
Anmerkung: Komponente und Signale werden zukünftig anders sein.

Kein Kraftsignal ist für die Lenkaktuatoren definiert, aber ein Stromsignal ist verfügbar.

Dieses Signal muss noch in eine Kraft mithilfe eines Kennfelds konvertiert werden.



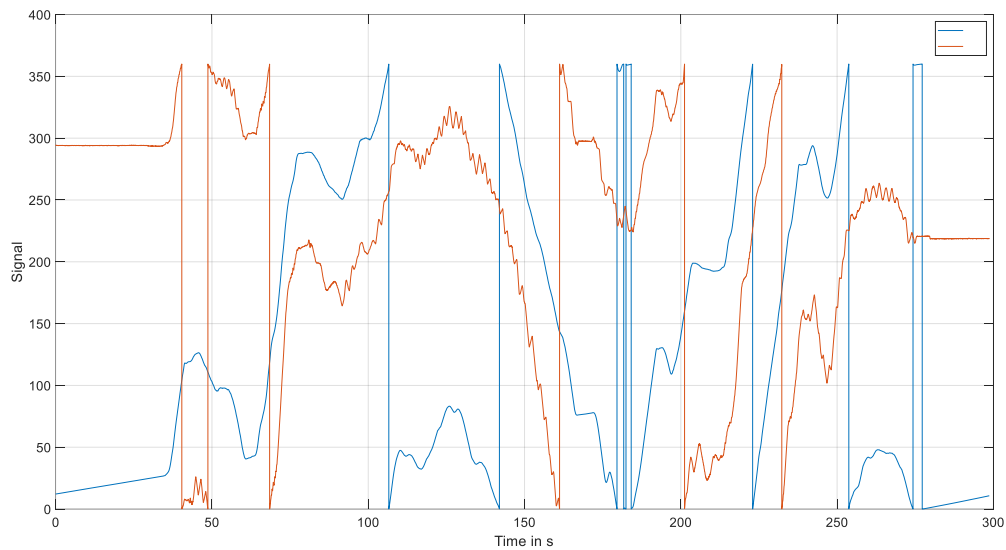
Die Stromsolwert sind aber nicht definiert und bleiben konstant



Gierwinkel

2 Gierwinkel sind verfügbar. Ein Signal ist wahrscheinlich mit einem Modell berechnet (als Kalman Filter bezeichnet). Die beiden Signale sind unterschiedlich, aber vielleicht nur wegen eines Offsets. Leider gibt es keine Referenz, um zu wissen was der korrekte Wert ist, oder in welchem Koordinatensystem die Winkel definiert sind.

Die Gierwinkel sind immer positiv, die Werte springen von null zu 360°.

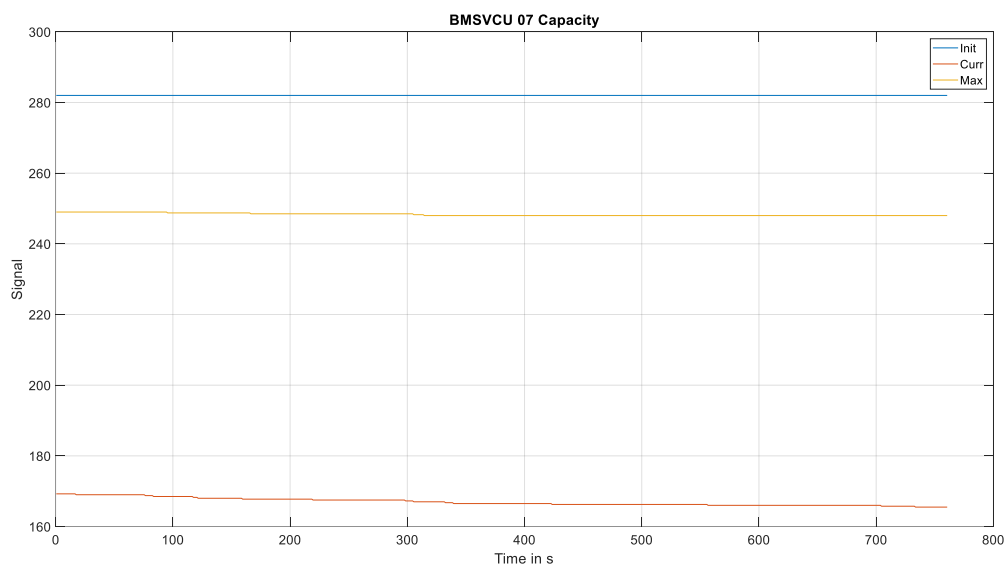


Batteriekapazität

Anmerkung: Komponente und Signale werden zukünftig anders sein.

3 Kapazitätssignale sind verfügbar, „init“ ist konstant und steht für die neue Batteriekapazität in Ah. Die aktuelle Kapazität („curr“ Signal) ist an der State of Charge (SOC) korreliert. Die maximale Kapazität („max“ signal) ist die erreichbare Kapazität bei Vollladung und sollte schon die Alterungseffekte mitbetrachten.

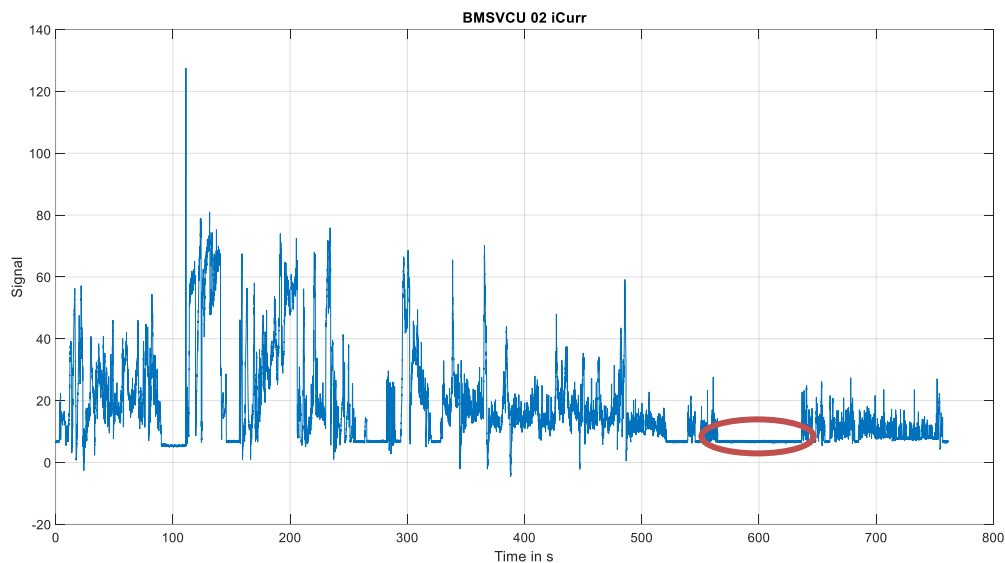
Dieses Signal scheint mit der Temperatur korreliert zu sein und überschätzt die Alterungseffekte (z.B. 1Ah Verlust in 300s)



Batteriestrom

Anmerkung: Komponente und Signale werden zukünftig anders sein.

Alle Steuergeräte brauchen zwischen 5-10A, deswegen beim Stillstand wird das Signal auch nicht null



Batteriewiderstand

Anmerkung: Komponente und Signale werden zukünftig anders sein.

Ein Initialwert sowie eine Abschätzung des aktuellen Werts sind auf dem CAN-Bus verfügbar. Der aktuelle Wert scheint hoch (+50% des Initialwerts, was zu ein State of Health von ungefähr 50% entspricht). Dieser Wert ist von Bosch (Batteriepackhersteller) geschätzt und nicht zuverlässig. Der Wert reduziert sich zwischen den Messungen, wahrscheinlich wegen eine Temperaturabhängigkeit, die nicht gut kompensiert wird.

COMPREDICT wird seine eigene Batteriezustandsindikator trainieren.

Beschleunigungen

Die Beschleunigungsachsen stimmen mit der Fahrzeugachsen (x = Längsrichtung nach vorne, z = Vertikalrichtung nach oben). Diese Fahrzeugachsen ändern sich aber während ein Querfahrt.

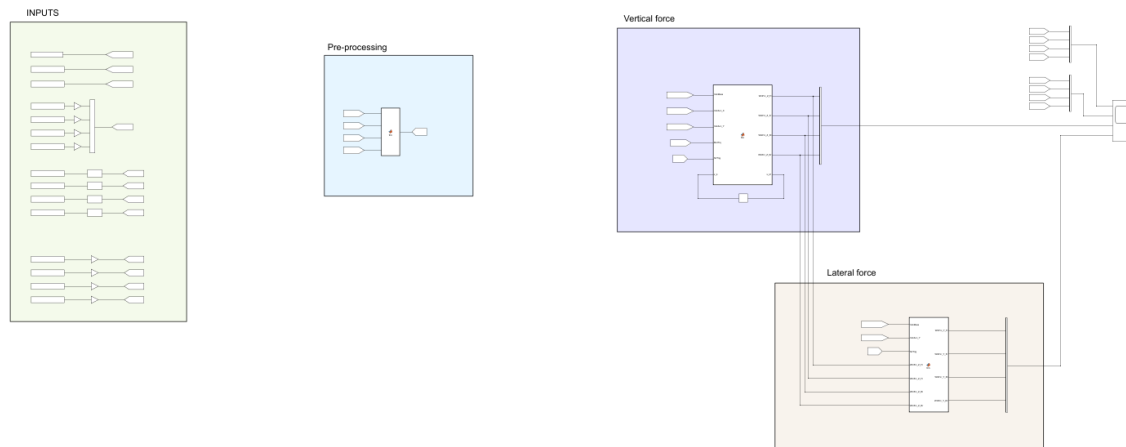
Weitere Eingangsgröße

Weitere notwendige Signale wie die Umgebungstemperatur oder die Batteriespannung wurden auch analysiert. Da sind keine Probleme oder merkwürdige Punkte aufgefallen.

Erweiterung Simulationsmodell

Ein Simulationsmodell wurde an dem IMS geliefert, um die laterale und die vertikale Dynamik abzubilden. Auf Basis der Versuchsträger-Messgrößen werden die laterale und vertikale Radkräfte geschätzt.

Die Simulation wurde als Simulink Blöcke entwickelt, um die Integration mit dem Modell von dem IMS zu erleichtern.

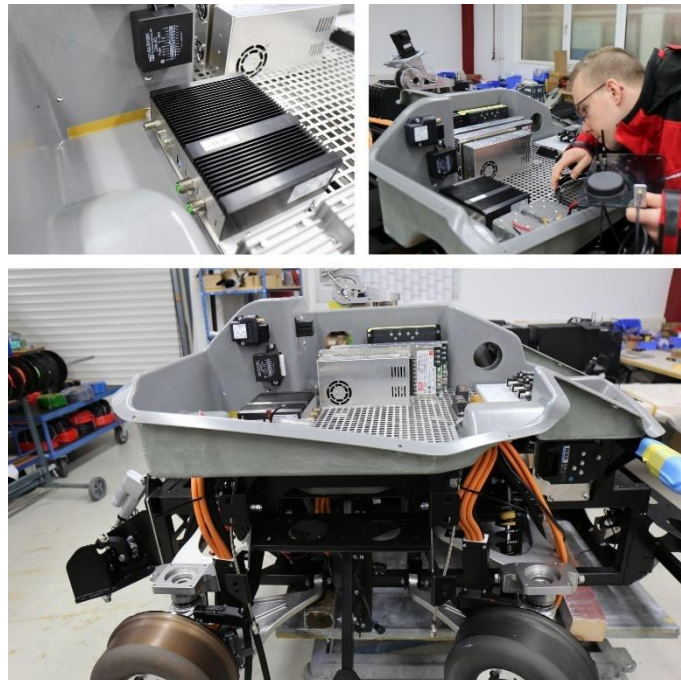


Zusammenfassung

Die notwendigen Signale für die Reifen-, Antriebsstrang- und Batterieverschleißrekonstruktion sind verfügbar. Manche Signale (wie die Motordrehzahl) werden noch gefiltert und andere plausibilisiert (wie den Lenkwinkel) um die Effekte der Messfehler oder der Ungenauigkeiten zu reduzieren. Alle Aktivitäten dieses Unterarbeitspaket wurden abgeschlossen.

UAP 5.2: Anpassung und Implementierung der Datenlogger

Datenlogger wurden bestellt und für die Sensoren der CityBots konfiguriert. Daten aus dem GPS, Interne Beschleunigungssensor (IMU) sowie bis 6 CAN-Busse werden aufgezeichnet und automatisch per LTE auf der Cloud zur Verfügung gestellt. Hardware wurde bestellt und an EDAG für die CityBot Montage geliefert.



Die Geräteinstellungen wurden aktualisiert, um diese an die neue Fahrzeug-Netzwerkarchitektur und die aktualisierte Signaldefinition anzupassen.

Die internen sowie auch die von Partnern wie IMS definierten Signalanforderungen werden berücksichtigt und in Zusammenarbeit mit EDAG abgestimmt.

Die aufgezeichneten Signale wurden auf einem Microsoft Azure Blob-Container hochgeladen und mit Partnern, wie beispielsweise IMS oder IAD, geteilt.

UAP 5.3: Aufbau Daten- und KI-Pipeline + Training Virtuellen Sensoren

In dieses UAP, wurde eine Datenpipeline aufgebaut, um automatisch die Daten von den CityBots bekommen und bereitstellen.

Die Daten von beide Traktoren, wurden automatisch mit den Datenlogger aufgezeichnet und an dem Konsortium zur Verfügung gestellt.

Auf Basis der gesammelten Fahrdaten wurden Virtuellen Sensoren trainiert, um wichtige Kenngröße zu generieren. Diese Informationen können dann als Eingangssignale für die Schadensschätzung (UAP 5.4) benutzt werden.

Drei Komponenten werden überwacht: der Antriebsstrang, die Batterie und die Reifen. Für den Antriebsstrang, die Batterie und die Reifen sind Zwischengrößen notwendig. Diese werden in diesem UAP berechnet.

Antriebsstrang

Der Antriebstrang von den CityBots Traktoren besteht aus Radmotoren hergestellt bei der Firma Elaphe: also aus ein E-Motor, ein Planetengetriebe, eine Trommelbremse direkt im Rad montiert.



Abbildung 1: Radmotor von CityBots Traktoren

Um die Motorschädigung zu bestimmen, müssen drei Kenngrößen betrachtet werden:

- Strom
- Drehzahl
- Temperatur

Diese drei Kenngröße sind direkt im Fahrzeug-Netz verfügbar (CAN-Bus) und werden für die vier Motoren ausgelesen.

Ein 3-dimensionales Lastkollektiv wird pro Motor berechnet. Hierbei kommt eine dem Stand der Technik entsprechende Methode, das Klassengrenzüberschreitungsverfahren, zum Einsatz.

Das Nutzungsfeld wird in diskreten Klassen eingeteilt:

- Strom in 4A Breite Klassen
 - Drehzahl in 4rpm Breite Klassen
 - Temperatur in 1°C Breite Klassen
- die Zeit pro Zelle wird aufsummiert für alle verfügbaren Daten

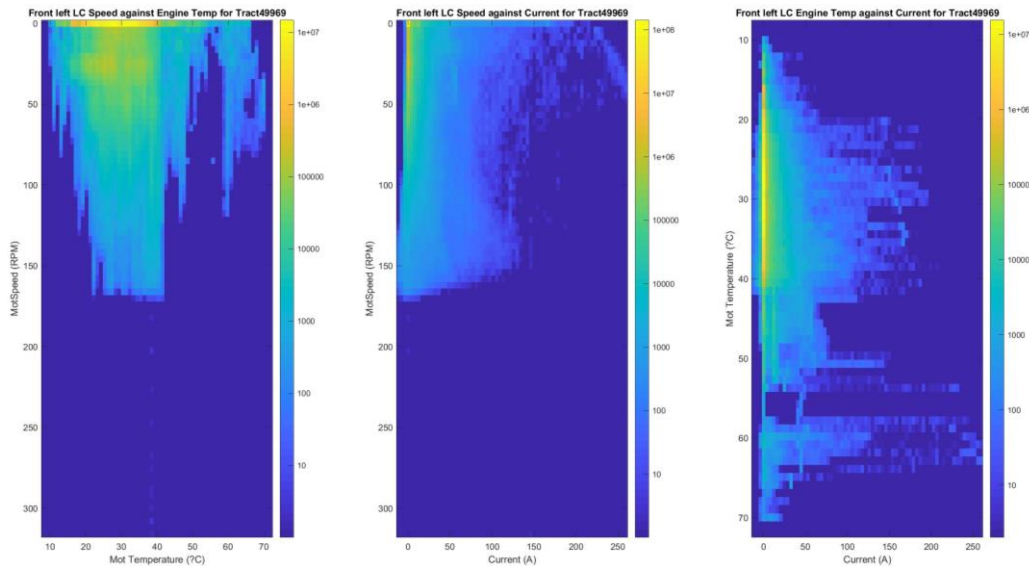


Abbildung 2: Lastkollektiv für Traktor1 - Motor

Das Drehmoment wird aus der Motorstrom proportional berechnet laut den Angaben im Hersteller-Datenblatt: $1\text{Nm} = 0,75\text{A}$. Die entsprechenden Werte werden als Grundlage für die Motorschädigung benutzt.

Batterie

Um die Batterieschädigung zu schätzen, muss die aktuelle Batterie-Kapazität ermittelt werden. Die Kapazität ist die Energiemenge, die in der Batterie gespeichert werden kann.

Die Kapazität wird mit einem Coulomb-Zählungsverfahren auf Basis des State-Of-Charge (SOC) und der Batteriestrom Signale abgeschätzt. Diese beiden Signale sind auf dem Fahrzeug-Netzwerk lesbar.

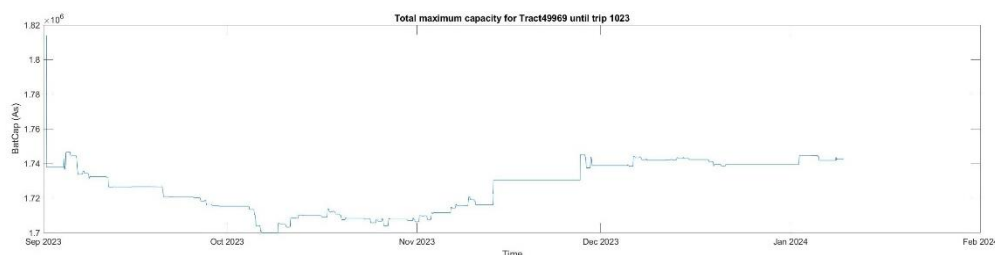


Abbildung 3: Batterie Kapazitätsabschätzung für Traktor 1

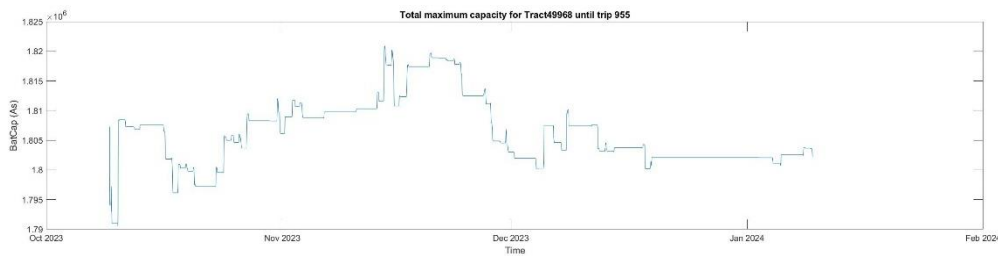


Abbildung 4: Batterie Kapazitätsabschätzung für Traktor 2

Reifen

Um den Reifenverschleiß mit Fahrzeugdaten zu ermitteln, wird die in den Reifen abgeleitete Energie durch die Lenk-, Brems- und Antriebskräfte geschätzt. Die CityBots-Traktoren sind besondere Fahrzeuge, dadurch dass:

- die Fahrgeschwindigkeit sehr gering ist (< 20 km/h)
- es ein Allradfahrzeug ist
- alle 4 Räder unabhängig voneinander lenken können

Daraus resultieren 3 Lenksituationen:

- Situation 1 für „Standardfahren“: mindestens 2 Räder zeigen in Fahrtrichtung oder die hinteren Räder drehen in entgegengesetzter Richtung zu den vorderen Rädern.
- Situation 2 ist die, wenn das Fahrzeug um sich selbst dreht.
- Situation 3 ist für laterale Bewegungen, wenn alle 4 Lenkwinkel dasselbe Vorzeichen haben.

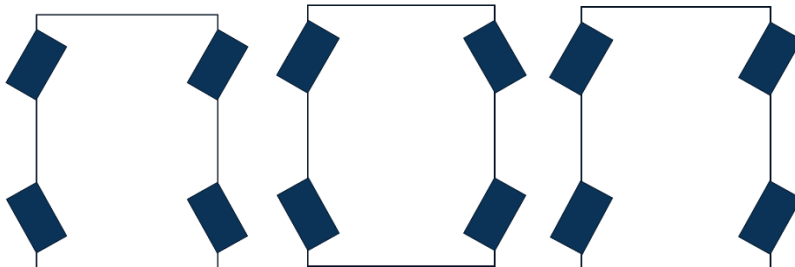


Abbildung 5: Von Links zu Recht, Fahrsituationen 1 bis 3

Die Reifenenergie kann pro Rad durch das Integrieren der Kräfte über die entsprechende Bewegungsrichtung berechnet werden.

$$Energie = \int F_x dx + \int F_y dy$$

Ein paar Annahmen werden getroffen:

- Die Vertikalkräfte werden vernachlässigt. Die vertikalen Bewegungen sind erst einmal minimal und nicht abschätzbar mit den verfügbaren Fahrzeugsignalen.
- In den Fahrsituationen 2 und 3 werden die Lateralkräfte auch vernachlässigt, da es keine Lateralbewegung (im Rad-Koordinatensystem) gibt.

Um die Energie zu schätzen, müssen dann nur noch die Längskräfte und Bewegungen in allen Fahrsituationen sowie die Lateralkräfte und Bewegungen in der Fahrsituation 1 geschätzt werden. Die lon-

itudinalen und lateralen Kräfte werden mithilfe des Fahrzeugdynamikmodells, wie es im UAP 5.1 entwickelt wurde, geschätzt.

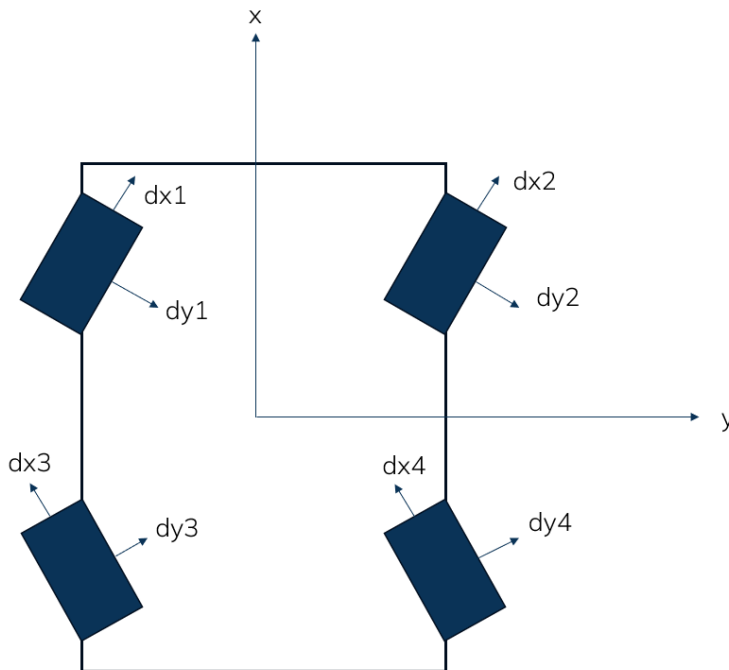


Abbildung 6: Radkoordinatensystem

Die inkrementale Längsbewegung dx wird mithilfe der Radgeschwindigkeit (ein CAN-Bus Signal) gemessen.

$$dx = WheelSpeed \cdot r_{dyn} \cdot dt$$

Mit r_{dyn} dem Radradius, $WheelSpeed$ die Radumdrehungsgeschwindigkeit und dt dem Zeitinkrement.

Die inkrementale Lateralbewegung wird auf Basis der Fahrzeug-Beschleunigung berechnet. Diese muss hierfür in das Rad-Koordinatensystem umgewandelt werden (a'_y)

$$a'_y = a_x \cdot \sin(SteeringAngle) - a_y \cdot \cos(SteeringAngle)$$

Mit Hilfe der Lateralbeschleunigung a'_y und Lateralgeschwindigkeit v'_y in dem Radkoordinatensystem kann die inkrementale Lateralbewegung d_y durch eine doppelte Integration berechnet werden.

$$d_y = a'_y \frac{dt^2}{2} + v'_y dt$$

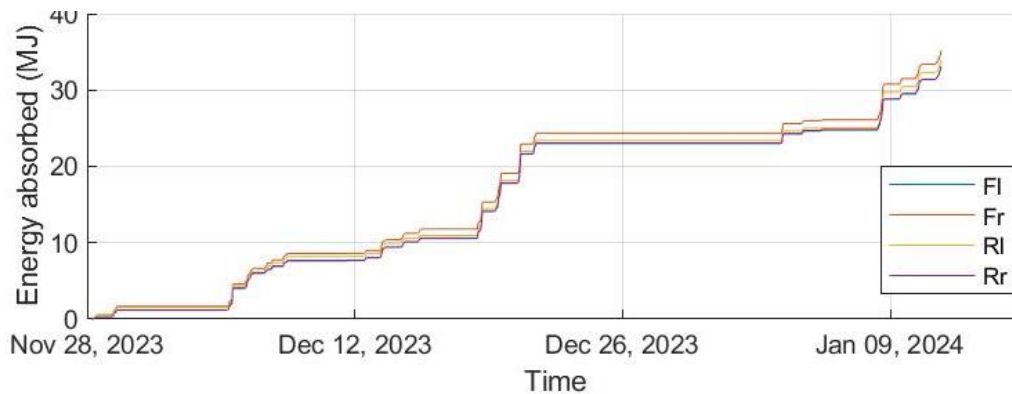


Abbildung 7: Reifenenergie für Traktor 1

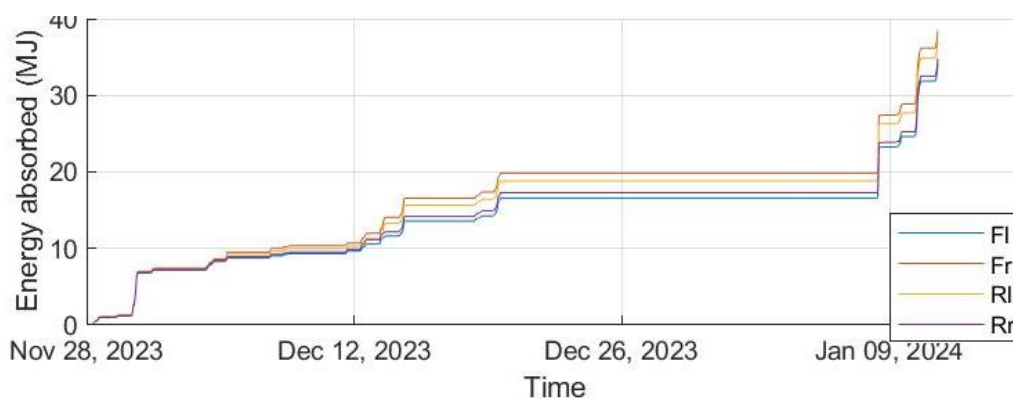


Abbildung 8: Reifenenergie für Traktor 2

UAP 5.4: Entwicklung KI-basierter Schadensmodelle + Kontinuierliche Überwachung von Komponente

In diesem Arbeitspaket werden die Fahrzeugsignale sowie die Ausgänge der virtuellen Sensoren aus UAP 5.3 verwendet, um die Komponentenschädigung abzuschätzen. Die Schätzungsabschätzung basiert auf KI-basierten Algorithmen und wird kontinuierlich aktualisiert, sobald neue Fahrzeugdaten verfügbar werden. Drei Komponenten werden überwacht: der Antriebsstrang, die Batterie und die Reifen..

Antriebsstrang

Die Antriebsstrangschädigung wird mit einer Miner-Elementar-Schadensakkumulation abgeschätzt. Da keine Prüfstanddaten vorliegen, müssen Annahmen für die Parameter getroffen werden. Auf Basis der Literatur und Erfahrung werden folgende Annahmen getroffen:

- Wöhler-Koeffizient = 5
- Lebensdauer von 2000 Stunden bei 350 Nm (maximales Drehmoment) und 550 U/min. Diese Annahmen werden validiert, sobald mehr Daten zur Verfügung stehen.

	Traktor 1	Traktor 2
--	-----------	-----------

Vorne Links	0,015%	0,035%
Vorne Rechts	0,015%	0,035%
Hinten Links	0,015%	0,035%
Hinten Rechts	0,015%	0,035%

Abbildung 9: Stand der Motorschädigung in Dezember 2023

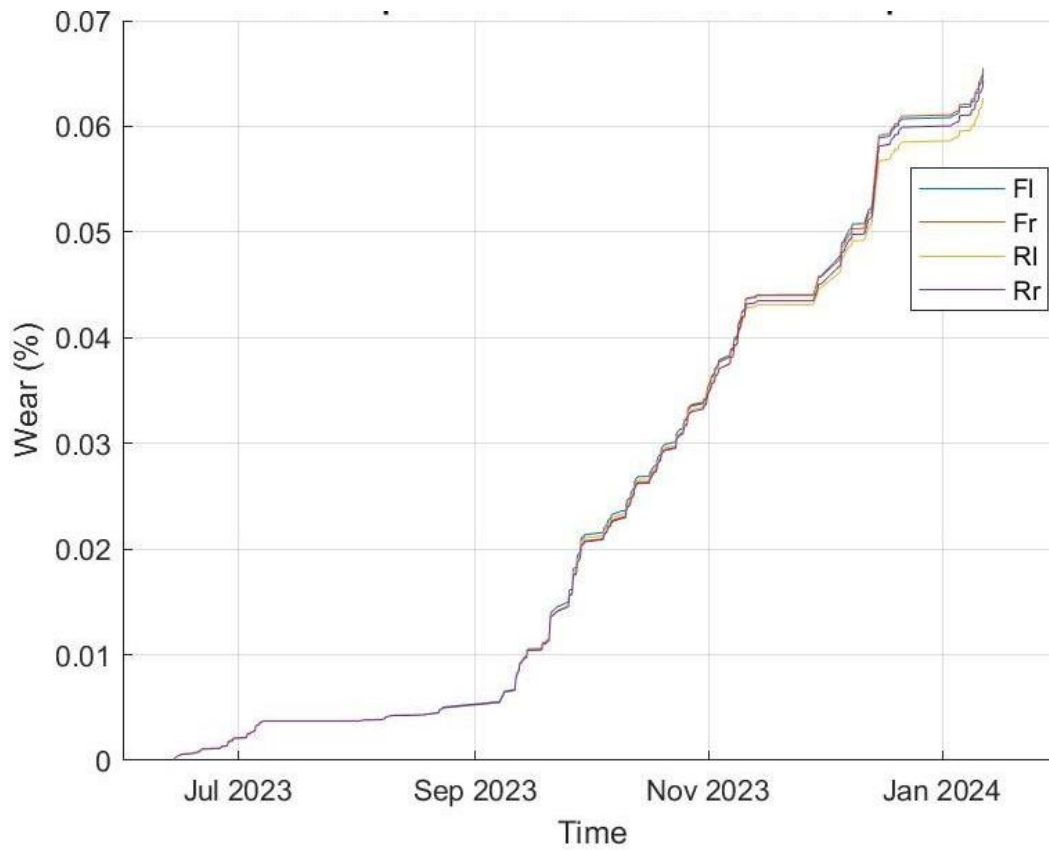


Abbildung 10: Antriebsstrangverschleiß Traktor 1

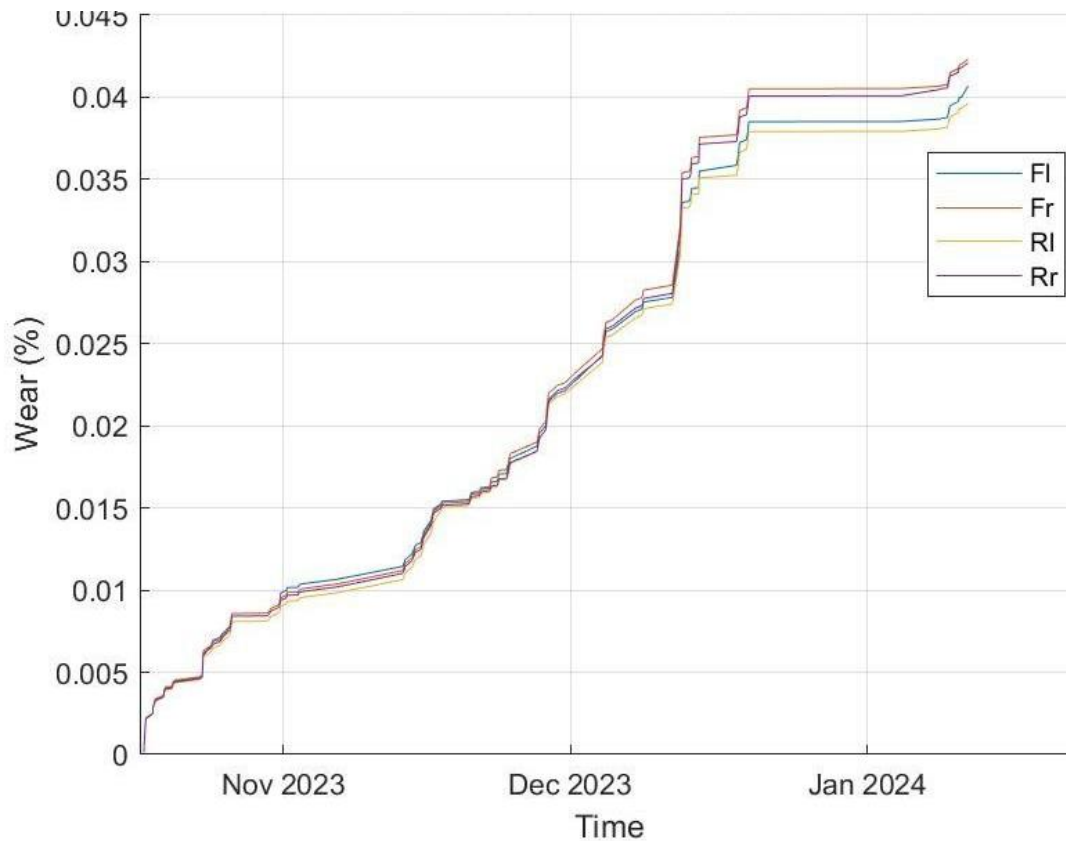


Abbildung 11: Antriebsstrangverschleiß Traktor 2

Batterie

Die Batterieschadigungsabschätzung basiert auf einer Kapazitätsverlustmessung. Die aktuelle Kapazität wird mit der nominalen Kapazität verglichen (10 Module von 50 Ah = 500 Ah), und eine Batterie wird laut einem Industriestandard als nicht mehr nutzbar betrachtet, sobald 30 % der Kapazität verloren gegangen sind.

Auf Basis der Fahrzeugdaten wurde den State of Health (SOH) für beide Traktoren berechnet:

	Traktor 1	Traktor 2
SOH	93%	99%

Abbildung 12: Batterieverschleiß

Im Rahmen des Projekts wurde erfolgreich ein Mechanismus zur Erkennung des Batterie-Modulwechsels implementiert. Die Systemintegration ermöglicht eine zuverlässige Identifikation des Wechsels, wodurch eine präzise Nachverfolgung und Analyse der Batteriemodule gewährleistet wird. Der erfolgreiche Wechsel wurde im Dezember 2023 bestätigt, wie in der folgenden Abbildung dargestellt, wo ein Modulwechsel durch ein Reset des SOH erkannt wird.

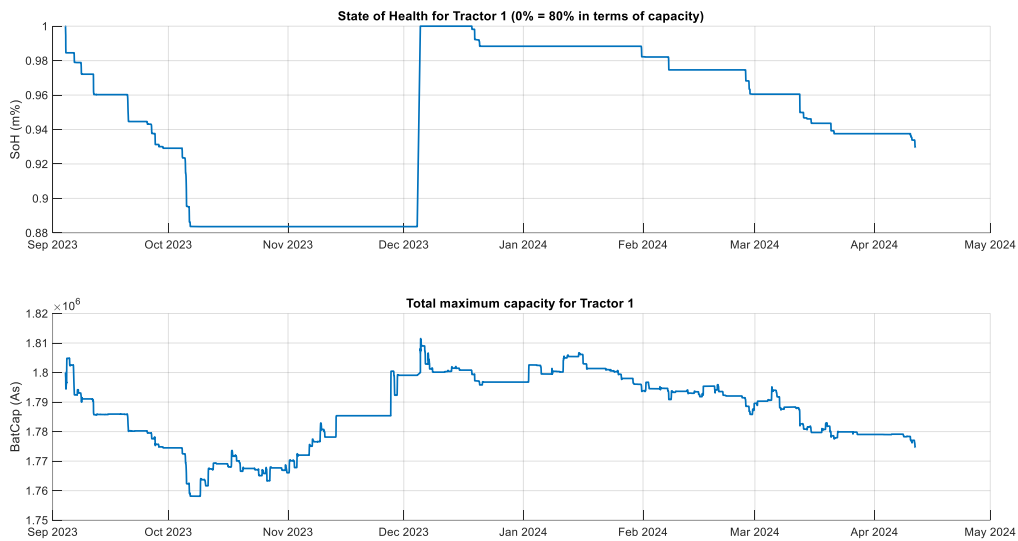


Abbildung 13: Detail Batterieverschleiß Traktor 1

Die Schätzung des Batteriezustands ist von mehreren Faktoren abhängig und erfordert eine präzise Erfassung relevanter Signale. Besonders kritisch ist die starke Empfindlichkeit gegenüber der Signalqualität des **State of Charge (SOC)**. In diesem Projekt wurde festgestellt, dass das vom Batteriehersteller bereitgestellte SOC-Signal nicht die beste Qualität aufweist, was die Genauigkeit der Zustandsbewertung beeinträchtigen kann. Dies stellt eine Herausforderung für die zuverlässige Analyse dar und sollte bei zukünftigen Optimierungen berücksichtigt werden.

Reifen

Ein Reifen kann im Laufe seines Lebens eine bestimmte Menge an Energie ableiten; die aktuelle Schädigung wird auf Basis der bislang abgeleiteten Energie berechnet. Die Energie wird pro Reifen kontinuierlich berechnet und normiert, um einen Schädigungswert abzuschätzen. Die Normierungswerte werden auf Basis von Referenzmessungen ermittelt und mit den Testdaten vom Campus FreeCity validiert.

In die folgenden Abbildungen wird den Verschleiß in % normiert. 0% steht für eine neue Reifen und 100% für ein ganz verschlissene Reifen vor.

Dieser Verschleiß kann in Vergleich zu der Zeit oder der Laufleistung abgebildet werden.

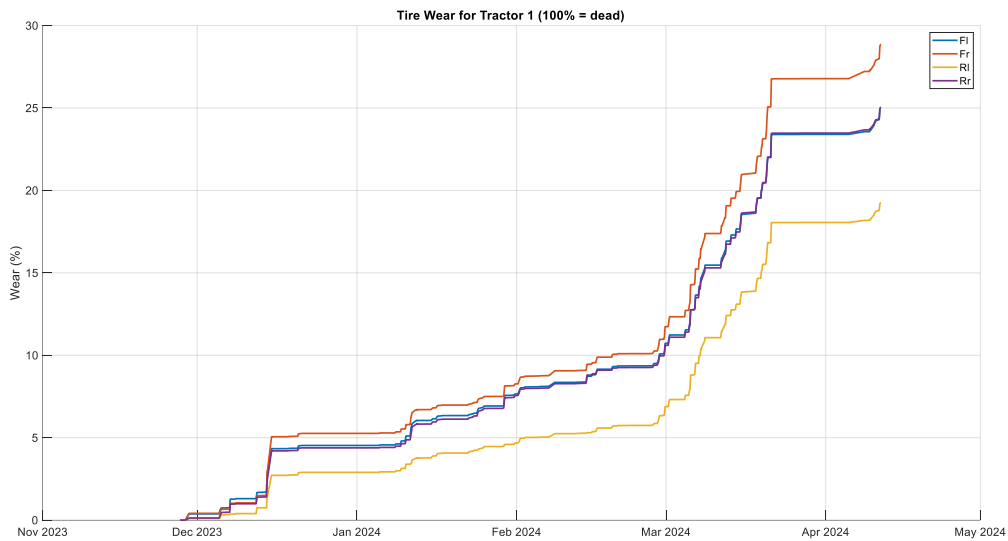


Abbildung 14: Reifenverschleiß Traktor1 (Zeit)



Abbildung 15: Reifenverschleiß Traktor1 (Laufleistung)

UAP 10.1.3: Synthese realistischer Nutzungsprofile für die Validierung

IMS hat das UAP erfolgreich abgeschlossen, mit dem Support von COMPREDICT. Für detaillierte Informationen verweisen wir auf den Bericht von IMS.

2. Gemeinsames Arbeitspaket – ELSI Begleitung

COMPREDICT war an dem ELSI-Kick-Off-Workshop vom 16.03.2022 aktiv beteiligt (inkl. Vor- und Nachbereitung). Inhaltliche Ziele waren die Erarbeitung einer gemeinsamen Themenlandkarte, die Reflektion von ELSI zur Einbindung in das Projekt sowie der eigenen Zielstellung aus einer gesellschaftlichen Sicht, die Erarbeitung von Fokusworkshops und Schwerpunktthemen (ELSI-Faktoren). Dazu stand COMPREDICT für Vor- und Nachgespräche zur Verfügung.

COMPREDICT war an dem ELSI-Fokus-Workshop Recht vom 07.03.2024 im HOLM mit Vertretern aller Arbeitspakete beteiligt (inkl. Vor- und Nachbereitung). Inhaltliche Ziele waren datenschutzrelevante Aspekte in der Projektarbeit zu identifizieren, zu reflektieren sowie erste Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Dazu stand COMPREDICT dem Verbund für Nachgespräche zur Verfügung. Für eine Beschreibung der Ergebnisse/Erkenntnisse sei auf den Zwischenbericht des Verbundkoordinators (HOLM GmbH) verwiesen.

Zudem stand COMPREDICT für den Austausch zur Anpassung des ELSI-Leitfadens in Abhängigkeit vom agilen Projektverlauf in den Regeltreffen zur Verfügung.

2. Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen

Alle im Rahmen des Campus Free City Projekts gesetzten Ziele wurden erfolgreich erreicht. Die Entwicklung und Implementierung virtueller Sensoren zur Überwachung von Reifenverschleiß, Antriebsbatterie-Degradation und Antriebsstrang-Zustand wurden erfolgreich an die spezifischen Anforderungen der Campus Free City Fahrzeuge angepasst. Die durchgeführten Tests und Analysen haben gezeigt, dass die entwickelten Modelle eine hohe Vorhersagegenauigkeit aufweisen und zuverlässig zur Bewertung des Fahrzeugzustands eingesetzt werden können.

Durch diese erfolgreiche Implementierung konnte die Machbarkeit virtueller Sensoren in einem realen urbanen Mobilitätskonzept demonstriert werden. Die erzielten Ergebnisse bestätigen die Eignung dieser Technologie für zukünftige Anwendungen in vernetzten und intelligenten Fahrzeugflotten.

3. Abweichungen in der Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung

Im Verlauf des Projekts wurden alle gesetzten Ziele erreicht. Eine wesentliche Abweichung ergab sich jedoch durch eine Laufzeitverlängerung um sechs Monate, die bewusst eingeplant und genutzt wurde. Diese Verlängerung ermöglichte eine umfassendere Datenerhebung sowohl im Real-Labor als auch im Mini-Labor, wodurch die Validierung und Optimierung der virtuellen Sensoren weiter verbessert werden konnte.

Insbesondere die Arbeitspakete 5.3 und 5.4, die stark von den erhobenen Messdaten abhängen, wurden entsprechend verlängert, um eine präzisere Analyse und Modellanpassung zu gewährleisten. Durch diese Anpassungen konnte die Qualität der Ergebnisse weiter gesteigert werden, ohne dass es zu wesentlichen Kostenüberschreitungen kam. Insgesamt hat sich die erweiterte Projektlaufzeit als vorteilhaft erwiesen, da sie eine fundierte Datengrundlage für die entwickelten virtuellen Sensoren geschaffen und deren Praxistauglichkeit im Rahmen des Campus Free City Projekts weiter gestärkt hat.

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Ausgaben- bzw. Kostenplanung ist in den Kostengruppen F0837 (Personalosten), F0838 (Reisen Inland und außereuropäische Reisen) und in der Kostengruppe F0850 (Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten) von der ursprünglichen Planung abgewichen.

Kostengruppe F0837:

Die uns zugeordneten Arbeitspakete konnten effizienter bearbeitet werden, als in der Gesamtvorkalkulation berücksichtigt.

Kostengruppe F0838:

Da in Folge der Corona-Pandemie bei vielen Veranstaltungen das Format dauerhaft von Anwesenheits- zu Onlinemeetings geändert wurde, fielen die Reisetätigkeiten geringer aus als in der Gesamtvorkalkulation vorgesehen.

Kostengruppe F0850:

Die Abweichung hängt damit zusammen, dass der Anbieter für die Cloud-Lösung keine geeignete Abrechnungsart, die ein Kostensplitting für einzelne Services ausgewiesen hätte, zur Verfügung stellen konnte. Da zusätzlich die Datenmenge viel geringer war als ursprünglich erwartet, haben wir uns dafür entschieden, die ebenfalls geringen Kosten nicht geltend zu machen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Veränderung der Mobilität hin zu vernetzten, elektrifizierten und autonomen Fahrzeugen ist ein bestätigter Trend, der neue technologische Ansätze erfordert. In diesem Zusammenhang spielen Digitalisierung und virtuelle Sensoren eine entscheidende Rolle, da sie eine Reduktion physischer Hardware ermöglichen. Dies führt nicht nur zu Kosteneinsparungen, sondern trägt auch zur Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks bei, indem ressourcenintensive Sensorhardware durch intelligente Softwarelösungen ersetzt wird.

Die entwickelten virtuellen Sensoren sind ein wichtiger technologischer Hebel für die Zukunft der Mobilität. Insbesondere im Bereich der prädiktiven Wartung leisten sie einen wertvollen Beitrag, da sie eine frühzeitige Erkennung von Verschleiß und potenziellen Ausfällen ermöglichen. Dies erhöht die Verfügbarkeit der Fahrzeuge, ein entscheidender Faktor für den betrieblichen Erfolg autonomer Fahrzeuge, die eine kontinuierliche Einsatzfähigkeit erfordern.

Durch die geleistete Arbeit konnte gezeigt werden, dass virtuelle Sensoren eine nachhaltige und effiziente Lösung darstellen, die nicht nur wirtschaftliche, sondern auch ökologische Vorteile bietet. Die im Rahmen des Campus Free City Projekts entwickelten Technologien sind daher nicht nur angemessen, sondern auch essenziell für die Weiterentwicklung zukünftiger Mobilitätskonzepte.

4. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens

Die im *Campus Free City* Projekt entwickelten virtuellen Sensoren leisten einen wichtigen Beitrag zur strategischen Vorbereitung auf die Mobilität der Zukunft. Durch die Implementierung digitaler Technologien können neue Mobilitätsformen effizienter, nachhaltiger und wirtschaftlicher gestaltet werden. Insbesondere für elektrifizierte und autonome Fahrzeuge bieten virtuelle Sensoren entscheidende Vorteile, indem sie eine vorausschauende Wartung, höhere Verfügbarkeit und eine Reduzierung physischer Sensorhardware ermöglichen.

Langfristig trägt diese Technologie dazu bei, Betriebskosten zu senken, den CO₂-Fußabdruck von Fahrzeugflotten zu verringern und neue Mobilitätskonzepte wie autonome Shuttle-Systeme oder Shared-Mobility-Dienste zuverlässig zu unterstützen. Damit bildet das Projekt eine wertvolle Grundlage für die weitere Entwicklung digitalisierter und nachhaltiger Mobilitätslösungen.

5. Darstellung des fortgeschriebenen Datenmanagementplan

Im Rahmen des *Campus Free City* Projekts wurden umfangreiche Fahrzeug- und Sensordaten erfasst, die maßgeblich zur Kalibrierung und Weiterentwicklung der virtuellen Sensoren beigetragen haben. Diese Daten dienen der Validierung der entwickelten Algorithmen und ermöglichen eine präzise Anpassung an die spezifischen Einsatzbedingungen der Campus Free City Fahrzeuge.

Die gesammelten Daten werden auch in einem beantragten Folgeprojekt weiterverwendet, um die entwickelten Methoden weiter zu verbessern und insbesondere die Vorhersagegenauigkeit der Verschleißprognosen für Reifen, Antriebsstrang und Batterie weiter zu optimieren. Dies stellt eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Technologie sicher und ermöglicht eine noch praxisnähere Umsetzung der Forschungsergebnisse.

Eine Nutzung der im Projekt erhobenen Daten in anderen Projekten oder Veröffentlichungen ist ohne die ausdrückliche Genehmigung der Konsortialpartner nicht vorgesehen.

6. Darstellung der durchgeführten öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen

Keine Veröffentlichung oder Messeteilnahme sind geplant