rosshaf

Robuste Sensoren und Systeme für Hoch Automatisiertes Fahren

Robustheit von Sensoren und Sensorsystemen gegenüber Umweltbedingungen für HochAutomatisiertes Fahren

Akronym: RoSSHAF

Partnerspezifischer Schlussbericht der RTB GmbH & Co. KG
zum BMWK-Verbundprojekt

Laufzeit 01.04.2021 - 30.09.2024

Förderkennzeichen: 19A21002D

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Informationen zum Bericht

Förderkennzeichen

19A21002D

Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmenkonzept „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ gefördert und vom Projektträger TÜV Rheinland betreut.

Partner

Autor

Thomas Eisenbach, RTB GmbH & Co. KG

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Die Robustheit von Sensoren und Sensorsystemen gegenüber Umweltbedingungen zu erhöhen und somit auch bei widrigen Umwelteinflüssen die sichere Nutzung von automatisierten Fahrfunktionen zu ermöglichen ist derzeit eine große Herausforderung, die durch das Projekt RoSSHAF adressiert wurde. Ziel von RoSSHAF war es einen maßgeblichen Beitrag zur Entwicklung innovativer Sensorik sowie angepasster Testverfahren für das hochautomatisierte Fahren (HAF) unter Schlechtwetterbedingungen zu liefern. Um dies zu erreichen, sollte in RoSSHAF neben einer mobilen fahrzeuggebundenen Sensorplattform eine ortsfeste Sensorplattform durch RTB aufgebaut werden, mit der neben Einzeltests verschiedener Sensoren auch Sensorgesamtsysteme dynamisch unter verschiedenen realen Wetterbedingungen getestet werden konnten und mit Hilfe der Analyse der zu erhebenden realen Sensormessdaten Störgrößen zu identifizieren, um diese virtuell in einem im Rahmen des Projektes aufzubauenden Simulations-Framework abbilden zu können. Mit Unterstützung ML-basierter Auswertung der Messdaten sollten Maßnahmen zur Steigerung der Robustheit von Sensoren und Sensorsystemen abgeleitet werden, die dann sowohl in der Simulation als auch mit den realen Sensorsystemen validiert werden können.

In diesem partnerspezifischen Bericht liegt im Folgenden der Fokus auf den Aufgaben zum Aufbau der ortsfesten Sensorplattform (Konzeption unter Berücksichtigung aller Anforderungen, Beschaffung und Aufbau, Umsetzung aller notwendiger Kommunikationsschnittstellen und Datenaustauschformate) und der umfangreichen Datenerhebung (Planung, Abstimmung und Durchführung von Feldmessungen, Aufbereitung der Messdaten) und Analyse realer Sensordaten mit dem Ziel einer Bereitstellung von Wirkprinzipien zur Erstellung von Simulationsmodellen.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zu Projektbeginn existieren verschiedene Sensorsysteme, basierend auf RADAR- und LiDAR-Technologie, die für das Verkehrsmonitoring im Bereich der Straßeninfrastruktur im Einsatz sind. Bei RTB gibt es bereits langjährige Erfahrungen mit der Rohsignalverarbeitung dieser Sensoren und der Fusion unterschiedlicher Sensordaten. Genaue Aussagen über die Robustheit dieser Sensorsysteme konnten bisher jedoch nicht getroffen werden. Dieser Aspekt sollte in systematisch RoSSHAF adressiert werden. Ebenfalls neu ist, dass im Rahmen des Projektes erstmals von verschiedenen örtlich getrennten Systemen der mobilen und der ortsfesten Sensorplattform erhobene Daten fein granular synchronisiert werden mussten, damit diese auf einer gemeinsamen Datenbasis verglichen und analysiert werden konnten.

Die gleichzeitige Erhebung von Wetterdaten einer Straßenwetterstation synchron zu den Rohdaten verschiedener Sensoren ist ebenfalls bisher in keinem anderen Forschungsprojekt durchgeführt worden und galt im Projekt RoSSHAF als ein sehr wichtiger Aspekt für eine systematische Auswertung mit Referenzdaten.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die folgende Übersicht zeigt den Zusammenhang der geplanten Arbeitspakete innerhalb des Projektes.

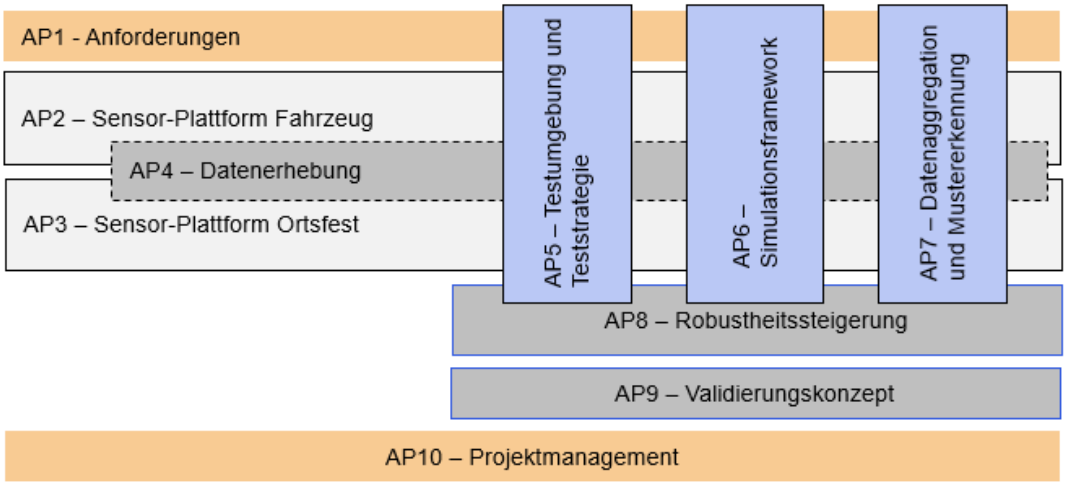

Figure 1: Übersicht der Arbeitspakete

RTB hatte die primäre Aufgabe in AP3 die ortsfeste Sensorplattform aufzubauen und damit in AP4 umfangreiche Sensordaten zu erheben und bereitzustellen. Darüber hinaus galt es in AP8 Maßnahmen zur Robustheitssteigerung der Sensorsysteme zu entwickeln.

I.4 Stand von Wissenschaft und Technik bei Projektbeginn

Zu Projektbeginn waren im Wesentlichen die folgenden für die eingesetzte Sensorik relevanten Veröffentlichungen bekannt.:

Das EU Projekt **DENSE** zeigte, dass keine der drei betrachteten Sensor-Technologien, wie RADAR, SWIR-Kamera und SWIR-LIDAR, allein mit allen Umweltbedingungen zurechtkommt.

Im ECSEL Forschungsvorhaben **RobustSENSE** ging es um die Entwicklung einer vernetzten Sensorplattform, die den Zustand und die Daten aller Sensorsysteme zentral auswertet und überwacht, um so Schwächen der einzelnen Sensortypen bei Schlechtwetterbedingungen auszugleichen.

In der Veröffentlichung „Influences of weather phenomena on automotive laser radar systems“ von R. H. Rasshofer1, M. Spies2, and H. Spies2, BMW, Spies Ing.-Büro wurden die Einflüsse von Regen, Spray, Schneefall und Nebel auf LiDAR-Sensoren beschrieben.

In der Veröffentlichung “Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS”, 2019 werden in “Testing and Validation of Automotive Point-Cloud Sensors in Adverse Weather Conditions” Maria Jokela, Matti Kutila and Pasi Pyykönen zitiert. Die Autoren erstellten ein mathematisches Modell des Performanz-Einflusses in Abhängigkeit der Regen-Dichte auf einen Lidar Sensor.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Vor Installation der ortsfesten Sensorplattform mussten notwendigen Genehmigungen eingeholt werden. Für die geplanten Messstellen an den Landstraßenabschnitten war der Kreis Paderborn als Straßenbaulastträger der betreffenden Kreisstraßen zuständig, für die Messstelle am Autobahnabschnitt der geplanten Teststrecke mussten Genehmigungen vom Straßenbaulastträger (der Autobahn GmbH), dem Betreiber des Maut-Systems (Toll Collect) und der Firma Swarco als Betreiber der Zählschleife vor Ort eingeholt werden. Außerdem musste die zuständige Autobahnmeisterei informiert und eingebunden werden, da sie für die Absicherung bei den geplanten Bauarbeiten am betreffenden Streckenabschnitt verantwortlich war.

Alle Beteiligten waren sehr kooperativ. Besonders hervorzuheben ist die gute Kooperation mit der Autobahnmeisterei Wünnenberg.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

Im Folgenden werden die im Rahmen des Projekts RoSSHAF durchgeführten Arbeiten beschrieben, für welche die Zuwendung verwendet wurde. Erzielte Ergebnisse sind die fertiggestellte ortsfeste Sensorplattform, erhobene Messdaten, die in Kapitel **AP4 Datenerhebung - Erhebung Messdaten und Generierung simulierter Daten** beschrieben sind und umgesetzte die Robustheit steigernde Maßnahmen, die in Kapitel **AP8 Maßnahmen zur Robustheitssteigerung** beschrieben werden.

Die Beschreibung der durchgeführten Arbeiten hält sich an die Bezeichnungen der im Projektantrag beschriebenen Arbeitspakete.

AP3. Aufbau einer ortsfesten Sensorplattform

Beim Aufbau der ortsfesten Sensorplattform besteht eine Herausforderung darin, Wirkgrößen zu identifizieren, die in sowohl unter den stationären als auch mit denen des Fahrzeugs nicht überlappenden Erfassungsbereichen ähnlich oder gleich sind, wie beispielsweise Wetterparameter.

Nach Festlegung der Sensoren für die ortsfeste und mobile Sensorplattform in AP1 galt es diese und eine für die anfallenden Datenmengen geeignete Computer-Hardware zu beschaffen. Damit die im Projekt zu erfassenden Sensordaten sowohl von der ortsfesten als auch von der mobilen Sensorplattform untereinander vergleichbar sind, wurden für die ortsfeste Sensorplattform die gleichen Sensoren beschafft, wie für den Aufbau der mobilen Sensorplattform. In AP1 wurde außerdem gemeinsam festgelegt, dass die Sensoren in Boxen integriert werden, die an einem Rack an der Fahrzeugfront montiert werden können, sowie für die ortsfeste Sensorplattform an einem Mast montiert werden können, der am Fahrbahnrand aufgestellt werden kann. Für das Fahrzeug wurden zwei Sensorboxen und für die ortsfeste Sensorplattform eine Sensorbox geplant.

Tabelle 1 Sensoren der ortsfesten Sensorplattform und ihre Sample-Parameter

Sensor	Auflösung	Bittiefe	Wiederholrate	Bitrate
IbeoNEXT 60°	128x80x3	16	25Hz	35,15Mbit/s
IbeoNEXT 11°	128x80x3	16	25Hz	35,15Mbit/s
ON Semiconductor AR0820AT 110°	3840x2160	12	25Hz	<2,5Gbit/s
ON Semiconductor AR0820AT 60°	3840x2160	12	25Hz	<2,5Gbit/s
Hella NanoRADAR 150°				30Mbit/s
Vaisala Road weather station				<10Mbit/s
			Summe:	< 5,1Gbit/s

In jeder Sensorbox sollten zwei verschiedene für den Automotiv-Bereich entwickelte LiDAR-Sensoren, zwei verschiedene hochauflösende Automotiv-Kameras, eine weitere Kamera zur Überwachung der geplanten Sensorboxabdeckscheibe und ein RADAR-Sensor integriert werden. Je einer der beiden LiDAR-Sensoren wurde für die Erfassung des Nahbereichs beschafft und hatte einen horizontalen Öffnungswinkel von 60°. Der andere LiDAR-Sensor war für den Fernbereich und hatte einen horizontalen Öffnungswinkel von 11°. Das gleiche Prinzip wurde bei den Kameras vorgesehen.
Während die Sensorboxen vom Kooperationspartner Hella konstruiert und nach Lieferung der Sensoren aufgebaut wurde, haben wir bei RTB ebenfalls baugleiche LiDAR-Sensoren beschafft, die an weiteren Messstationen an der für die Messfahrten geplanten Teststrecke aufgestellt werden sollten. Nach Lieferung dieser LiDAR-Sensoren konnte die Implementierung der geplanten Software-Plugins für das Aufzeichnen der LiDAR-Daten gestartet werden. Mit Hilfe der Sensoren und des vom Hersteller mitbeschafften Software-Development-Kits (SDK) konnte so frühzeitig auf die Daten der Sensoren zugegriffen werden und die Plugin-Software implementiert und getestet werden. Auf diese Weise konnte der Zeitverzug bis zur Fertigstellung der Sensorboxen bei Hella sinnvoll genutzt werden.

AP3.1 Wetter Sensorik

In AP1 wurde zudem festgelegt, dass an einer der geplanten Stationen entlang der Teststrecke Wetterdaten erfasst werden sollten. Dazu wurde eine Straßenwetterstation beschafft. Insbesondere Sichtweiten, Niederschlagsmengen, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und die aktuellen Windrichtungen sollten ermittelt werden.

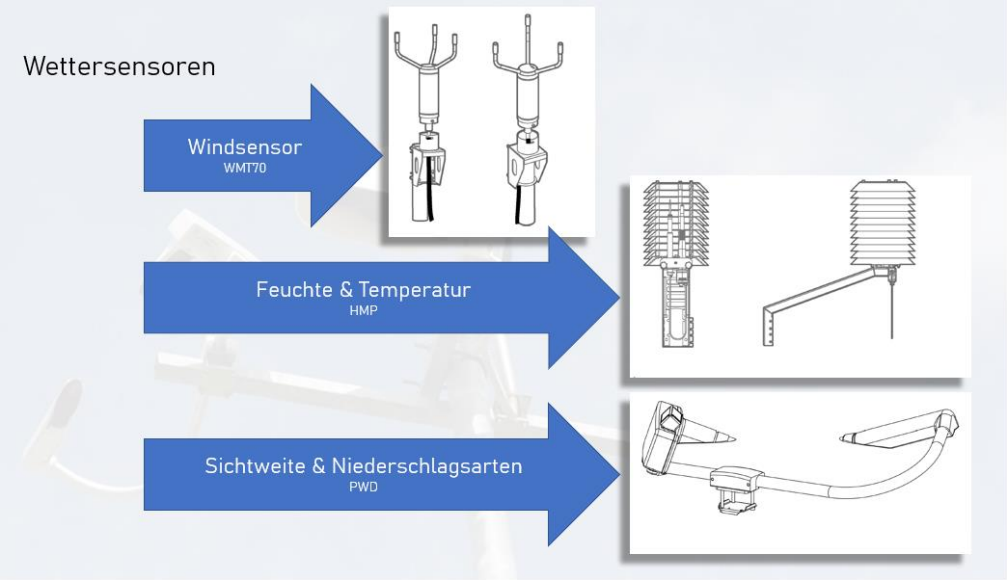

Abbildung 1 Für das Projekt ausgewählte Wettersensoren der Straßenwetterstation

Die Sensordaten dieser Straßenwetterstation sollten ebenfalls mit aufgezeichnet werden. Um die Sensoren und die notwendige Auswerteeinheit auch an anderen Messstellen einsetzen zu können, wurde ein modulares Konzept zur Installation und Verkabelung entworfen.

Aufbau und Konzept dieser Integration sind im Kapitel AP3.6 näher beschrieben.

Als Teststrecke im Projekt RoSSHAF wurde eine Strecke ausgewählt, die bereits im vorherigen Projekt SHT ausgewählt wurde und verschiedene typische Streckenanteile, wie Landstraßenabschnitte, Ortsdurchfahrten und Autobahnabschnitte beinhaltet. Das folgende Luftbild zeigt den Verlauf der Teststrecke.

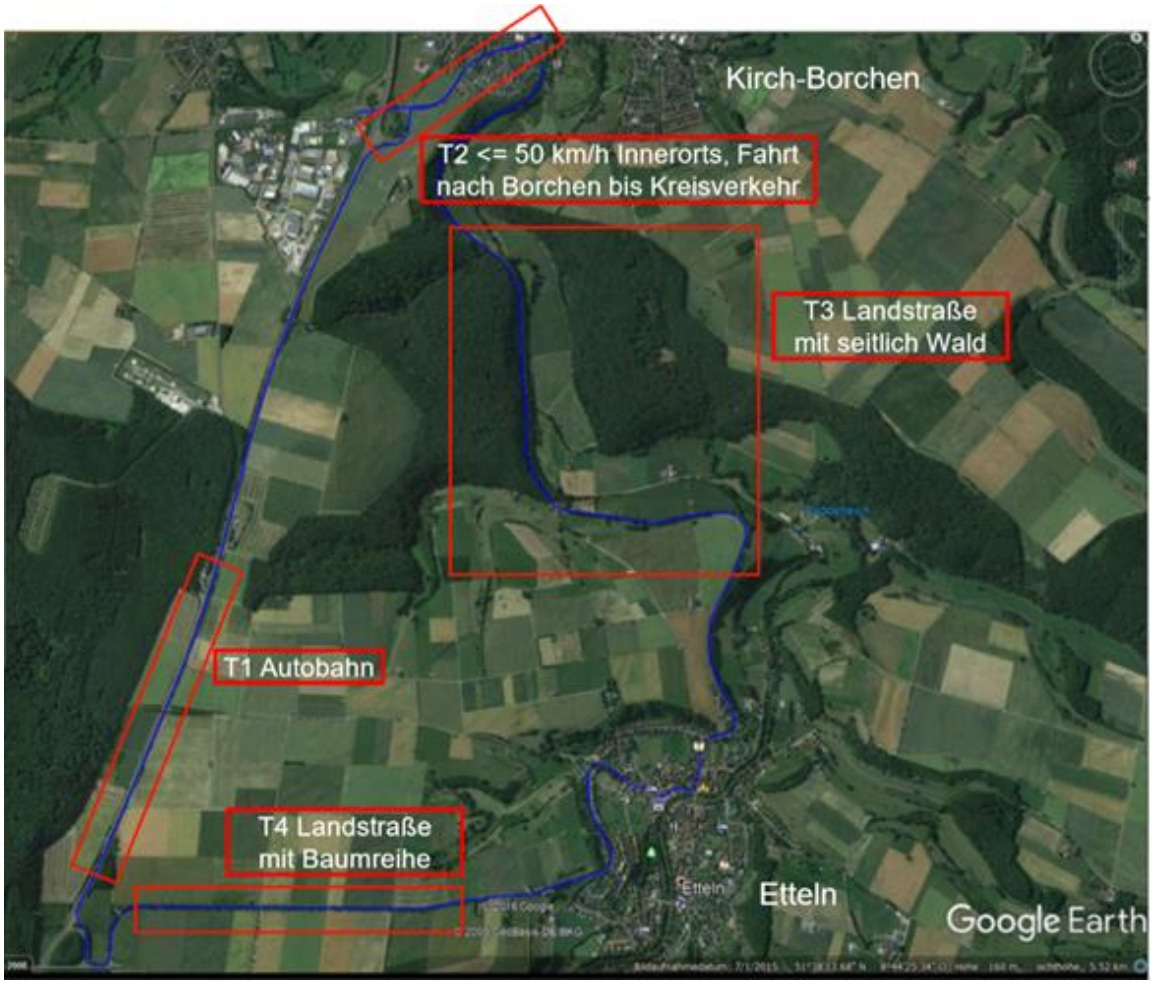

Abbildung 2Luftbild der ausgewählten Teststrecke mit den verschiedenen Streckenabschnitten

Parallel zur Implementierung der Software für das Aufzeichnen und Visualisieren der Daten, wurden geeignete Messstellen für die ortsfeste Sensorplattform entlang der Teststrecke ausgewählt. Die Messstellen sollten dabei gut zu erreichen sein, eine sichere Möglichkeit bieten für Installations- und Wartungsarbeiten, bei denen der Straßenverkehr nicht beeinträchtigt werden sollte, möglichst alle Streckentypen abdecken und im Idealfall Zugang zur Energieversorgung für einen dauerhaften Betrieb bieten. Außerdem sollte in der Nähe der Messstellen ein als Referenzziel brauchbares Schild oder Bauwerk im Straßenraum sichtbar sein. Dieses sollte von den Sensoren der ortsfesten Sensorplattform als auch bei einer Vorbeifahrt von den Sensoren des Versuchsfahrzeugs erfasst werden können.

AP3.2 Planung und Genehmigung der Messstellen

Für die Landstraßenabschnitte wurden zwei Messstandorte gefunden, an denen in der unmittelbaren Nähe eine Abstellmöglichkeit für einen Transporter gegeben ist. Beide Standorte verfügen jedoch über keinen Zugang zu einer dauerhaften Energieversorgung, so dass die geplanten Systeme energieautark ausgelegt wurden. Da ein permanenter Betrieb aufgrund zu geringer Akkustandzeiten ausgeschlossen ist, wurde bei RTB intern entschieden die Sensorik nicht permanent an den Standorten verbleiben zu lassen, da Diebstahl und Vandalismus nicht auszuschließen sind.

Vor der Installation mussten hierfür die notwendigen Genehmigungen eingeholt werden. Für die geplanten Messstellen an den Landstraßenabschnitten war der Kreis Paderborn als Straßenbaulastträger der betreffenden Kreisstraßen zuständig.

Für die Messstelle am Autobahnabschnitt der geplanten Teststrecke war der Aufwand etwas größer. Hier mussten Genehmigungen vom Straßenbaulastträger (der Autobahn GmbH), dem Betreiber des Maut-Systems (Toll Collect) und der Firma Swarco als Betreiber der Zählschleife vor Ort eingeholt werden. Die zuständige Autobahnmeisterei musste informiert und eingebunden werden, da sie für die Absicherung bei den geplanten Bauarbeiten am betreffenden Streckenabschnitt verantwortlich ist. Alle Beteiligten waren sehr kooperativ. Besonders hervorzuheben ist die gute Kooperation mit der Autobahnmeisterei Wünnenberg.

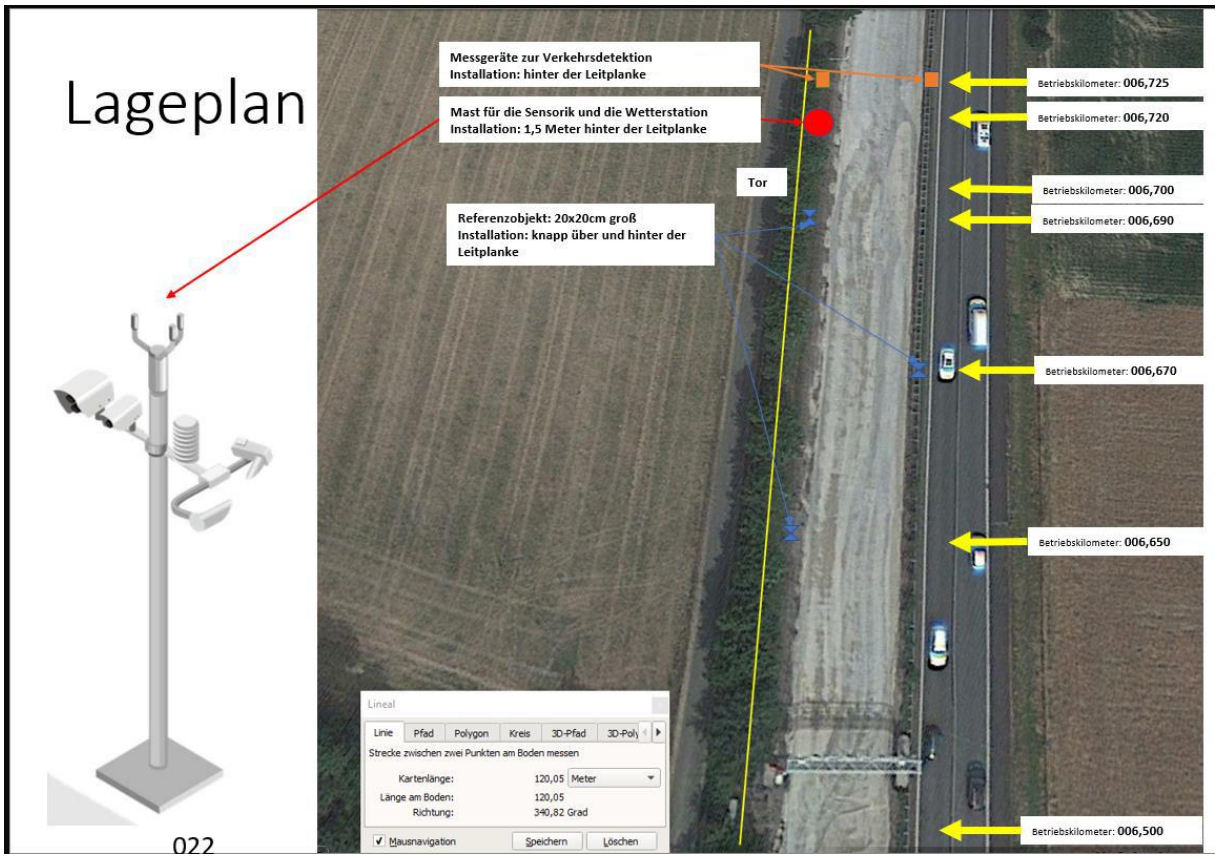

Abbildung 3 Planung des Aufbaus der Messstelle an der Autobahn A33 für das Einholen der Genehmigungen

Die an der Bundesautobahn BAB A33 geplante Messstelle wurde so ausgewählt, dass sie gut erreichbar ist für Wartungsfahrzeuge, was bei dem Standort über einen wenig befahrenen Feldweg gegeben ist. Außerdem bietet dieser Standort einen Zugang zu einem

Stromanschlusskasten, über den bereits eine Maut-Brücke und eine Zählschleife versorgt werden. Auf diese Weise ist eine dauerhafte Energieversorgung gewährleistet. Die Mautbrücke stellt außerdem als festes Bauwerk im Sichtbereich eine gut nutzbare Referenzmarke für die Sensoren des Versuchsfahrzeugs und der ortsfesten Sensorplattform dar. Über die Mautbrücke konnten Leitungen zu weiteren ortsfesten Sensoren im Bereich der Mittelleitplanke zwischen den beiden Richtungsfahrbahnen verlegt werden. Erste Genehmigungen wurden Mitte 2022 erteilt. Bis zum tatsächlich angezeigten Baubeginn, nachdem alle Genehmigungen erteilt waren, dauerte es noch bis Ende August 2022.

AP3.3 Bauarbeiten zur Vorbereitung der Messstelle A33

Im September 2022 begannen wir mit den umfangreichen Arbeiten am Standort. Es wurden Gräben für die Verlegung von Signal- und Versorgungsleitungen gezogen und Boden ausgehoben für das Betonieren von Fundamenten für die Masten. Hier galt es die genauen Vorgaben und Auflagen in den Genehmigungsdokumenten einzuhalten, um insbesondere bei den notwendigen Tiefbauarbeiten keine Leitungen zu der Mautbrücke, den Notrufsäulen oder der Zählschleife zu beschädigen.

Abbildung 4 Bilder vom Baufortschritt – Vorbereitende Tiefbau und Betonierarbeiten (Links, Mitte) installierter Mast mit Anschlusskasten für Stromversorgung und Technik

Die Lieferung wichtiger Komponenten wie der Wettersensoren und der LiDAR-Sensoren verzögerte sich aufgrund der damaligen Liefersituationen der Hersteller. Glücklicherweise wurden die frühzeitig bestellten LiDAR-Sensoren Mitte 2022 geliefert und es fand ein Workshop mit dem Hersteller zum Thema Sensor-Handling und Tooling statt. Erste Inbetriebnahmen und Tests mit den Sensoren konnten erfolgreich durchgeführt werden.

Während die Bauarbeiten und Installationen erster ortsfester Sensoren am Standort an der A33 zum Ende 2022 weitestgehend abgeschlossen waren, konnte auch die notwendige Implementierung von Software-Modulen für die Datenakquise der hochauflösenden Kameras und der LiDAR-Sensoren sowie deren Visualisierung und Aufzeichnungsmöglichkeit weitestgehend erfolgreich abgeschlossen werden. Hierbei unterstützte Projektpartner Hella durch eine Leihgabe einer der Kameras, die später in die Sensorbox integriert wurde. Bei den LiDAR-Sensoren galt es noch eine praktikable Lösung für den Betrieb von mehreren Sensoren zu finden. Der Hersteller hatte dazu zwar ein Update seines SDKs angekündigt, dass jedoch bis zum Ende des Projektes nicht mehr verfügbar war. Der geplante RADAR-Sensor des Kooperationspartners Hella konnte erfolgreich in einer Testumgebung in Betrieb genommen werden. Vorarbeiten für die Visualisierung der Daten dieses Sensors wurden begonnen.

AP3.4 Planung Messstellen an Landstraßenabschnitten

Da die Kosten der Sensorik, die gemäß Anforderungen festgelegt wurde, das ursprünglich im Antrag abgeschätzte Budget überschritt, musste die Ausstattung der Messstellen neu geplant werden. Dadurch kam es zu weiteren Verzögerungen. Um trotz unzureichendem Sachmittel-Budget eine möglichst optimale Abdeckung mit Messstellen entlang der geplanten Teststrecke zu gewährleisten, wurde entschieden die Messstellen unterschiedlich auszustatten und die Anzahl der Messstellen auf drei zu reduzieren., so dass an drei der verschiedenen Streckenabschnittstypen jeweils eine Messstelle eingerichtet wird. Dabei hat die Messstelle am Standort der A33 die aufwändigste und teuerste Ausstattung erhalten. Gründe dafür sind neben der dauerhaften Energieversorgung auch die Tatsache, dass die Sicherheit der Ausrüstung gegen Vandalismus und Diebstahl an diesem eingezäunten Standort an der Autobahn am höchsten eingeschätzt wurde.

Als weitere Maßnahme zur Finanzierung der Messstellenausstattung wurde bei RTB entschieden einen Antrag auf Mittelumwidmung zu stellen. Da die Arbeiten in AP1 bei RTB weniger Zeit benötigt hatten als ursprünglich im Antrag geplant und weitere Zeitaufwände geringer eingeschätzt wurden, wurde Mitte 2023 nach Abstimmung mit den Kooperationspartnern ein Antrag auf Umwidmung von Personalmittel in Sachmittel gestellt, um mit dem dann erhöhten Sachmittel-Budget das Projektziel von AP3 zu erreichen. Um die letzten ausstehenden Beschaffungen der für die Aufzeichnung notwendigen Industrie-PCs nicht weiter zu verzögern, wurden diese auf eigenes Risiko noch vor Bewilligung der Umwidmung beschafft.

AP3.5 Signalflusskonzept – Implementierung Software-Module

Bei RTB war von Anfang an geplant die verschiedenen Sensordaten mit Hilfe der bei RTB bereits in verschiedenen anderen Projekten eingesetzten Framework-Software IoProc auf einem leistungsfähigen Industrie-PC aufzuzeichnen. Der Vorteil bei dieser Vorgehensweise war, dass nur wenige Software-Module, die Input-Plugins für die Datenakquise der 4K-Kameras und der LiDAR-Sensoren neu implementiert werden mussten. Alle anderen Plugins des Entwicklungs-Frameworks IoProc konnten ohne größere Anpassungen direkt verwendet werden.

Die folgende Abbildung zeigt das ursprünglich geplante Signalfluss-Konzept für die Messstation an der Autobahn A33, an der neben den Sensoren der Sensorbox auch die Daten der Straßenwetterstation aufgezeichnet werden.

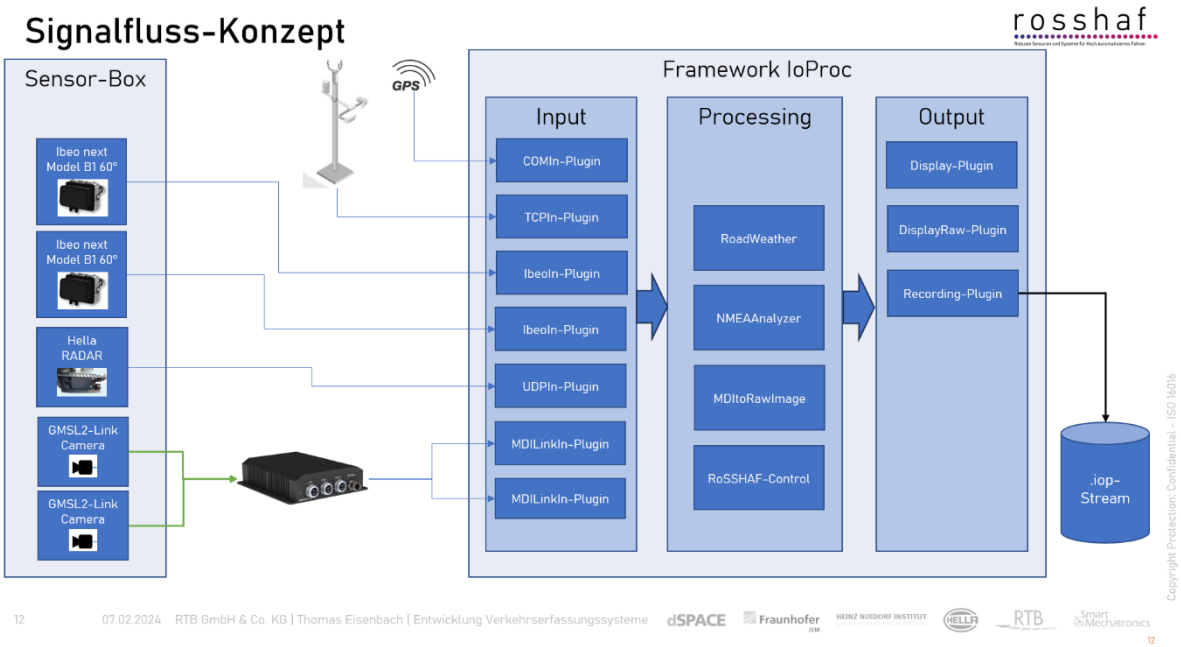

Abbildung 5 Das ursprüngliche Konzept des Signalflusses der Sensorsignale und der Software IoProc für die Aufzeichnungen

Die Sensordaten der beiden LiDAR-Sensoren des Herstellers Ibeo sollten mit jeweils einem für diesen Zweck im Projekt implementierten Input-Plugin (IbeoIn-Plugin) angenommen und in Form von mit Metadaten des Sensors angereicherten Punktewolken in einem Kanal weitergegeben werden. Da jedoch das SDK des Herstellers nur einen Zugriff auf die Daten eines LiDAR-Sensors gleichzeitig zuließ, und man für den zweiten Sensor nur über eine zweite entsprechend konfigurierte virtuelle LAN-Verbindung Zugriff bekommt, musste auf die Lieferung der bestellten leistungsfähigen Industrie-PCs gewartet werden, mit deren dedizierten Netzwerkkarten dann ein realistischer simultaner Test der Datenakquise und Aufzeichnung möglich war. Es stellte sich jedoch im Verlauf des Projektes heraus, dass weitere Restriktionen des Sensor-SDKs bezüglich genutzter Bibliothekversionen und Sprachstandards eine direkte Integration in das Entwicklungs-Framework IoProc als Input-Plugin erheblich erschwerten.

Aus diesem Grund wurde entschieden, dass die Datenakquise der LiDAR-Daten beider Sensoren in ein externes eigenständig laufendes Tool (IbeoReceiver) verschoben wird, das dann die Punktewolken-Kanäle, über die in IoProc bereits vorhandene GRPC-Schnittstelle bereitstellt.

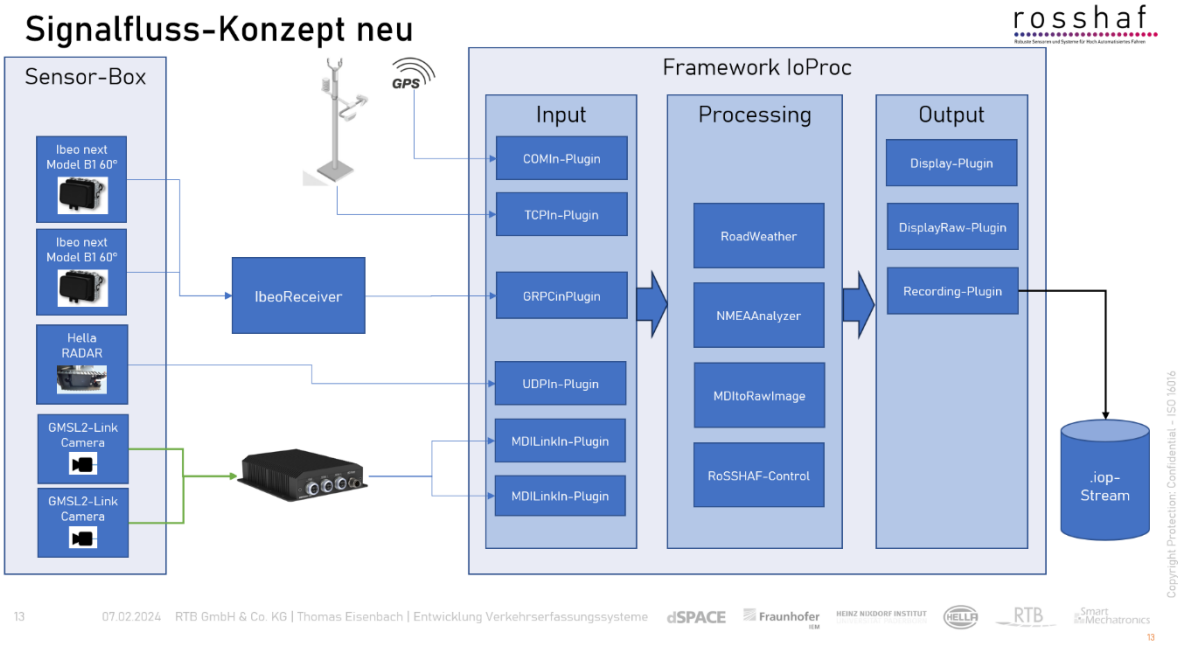

Abbildung 6 Angepasster Signalfluss mit IoProc und der externen Software IbeoReceiver

Das neue Signalflusskonzept ermöglichte dann auf den dafür beschafften Industrie-PCs mit zwei entsprechend konfigurierten VLANs den simultanen Betrieb beider LiDAR-Sensoren. Nur das Handling wurde durch das zusätzliche Starten des externen IbeoReceivers etwas komplizierter, als es zuvor bei integrierten IbeoIn-Plugins der Fall war. Damit die bei den geplanten koordinierten Messkampagnen von ortsfester und mobiler Sensorplattform entstehenden Aufzeichnungen im Nachgang synchronisiert werden können, wurden allen Industrie-PCs mit einem GPS-Modem ausgestattet, über das eine Zeitstempelung mit der globalen UTC-Time realisiert wird.

Bevor das gesamte Sensorsystem in Betrieb genommen werden konnte, galt es die verschiedenen Wettersensoren fachgerecht mit der Datenauswerteeinheit (DMU) der Straßenwetterstation über einen mitgelieferten Klemmenblock zu verbinden, was sich aufgrund einiger Fehler in den Installationsanleitungen zunächst als etwas schwierig erwies. Auf Nachfrage beim Hersteller konnte die Installation mit einer korrigierten Version dann jedoch erfolgreich nachgeholt werden.

AP3.6 Integration der Wetter-Sensorik

Damit der Aufwand bei einem Umzug der Straßenwetterstation an einen anderen Messstandort mit möglichst wenig Aufwand erfolgen kann, wurde ein Konzept entwickelt, bei dem alle Wettersensoren durch robuste, wasserdichte und vertauschungssichere Steckverbindungen an die Box mit der DMU-Auswerteeinheit angeschlossen werden konnten. Außerdem wurde der Industrie-PC mit dem alle Sensordaten aufgezeichnet werden sollen in die Box integriert. Bei Montage und Demontage können auf diese Weise Sensoren getrennt von dem Industrie-PC und der Auswerteeinheit DMU vom Mast abgebaut werden, was den Aufwand und die Arbeitssicherheit vor Ort deutlich reduziert. Die Wetterstations-IPC-Box wurde auf der Rückseite mit einer Mastaufnahme ausgestattet. Die Box hat eine wasserdichte abschließbare Tür an der Vorderseite, über die der IPC und die DMU, sowie alle Netzgeräte, Verteiler und Schalter erreicht werden können.

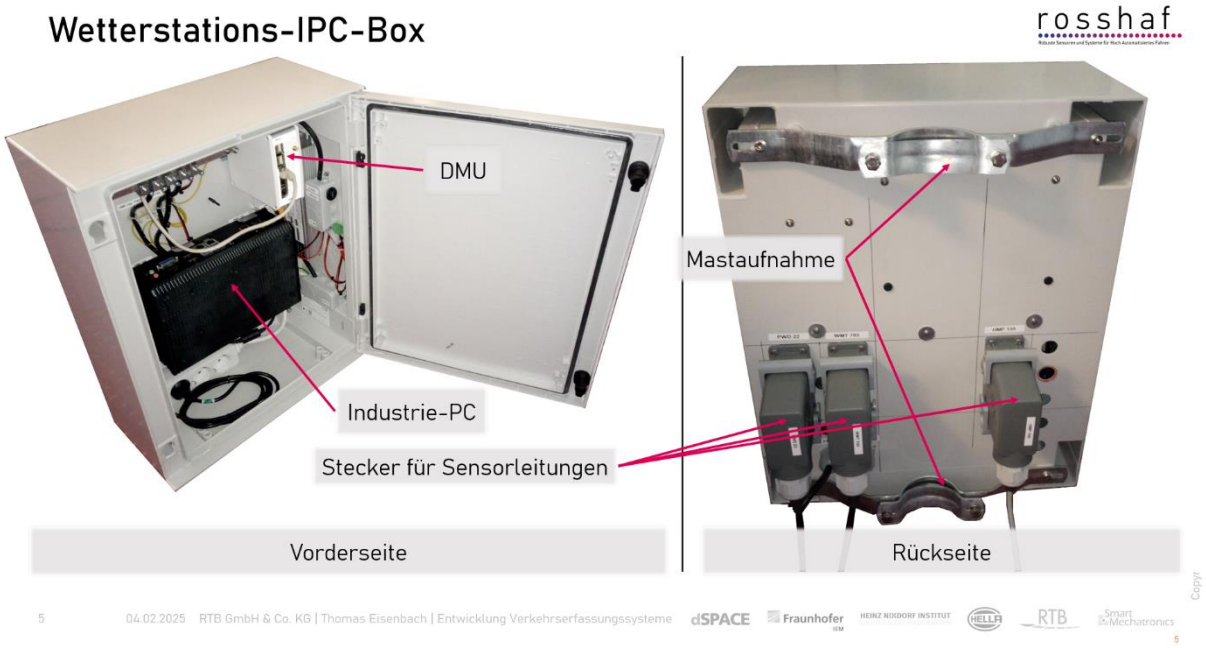

Abbildung 7 Box für die Integration der Module der Straßenwetterstation und des Industrie-PCs für das Recording aller Sensordaten

Nachdem die Sensorbox von Kooperationspartner Hella zur Verfügung gestellt war und die Wetterstations-IPC-Box fertiggestellt war, musste eine geeignete Lösung für die Integration der Sensorbox mit den Automotive-Sensoren und allen notwendigen Media-Convertern und der Spannungsversorgung in das Gesamtsystem entwickelt werden.

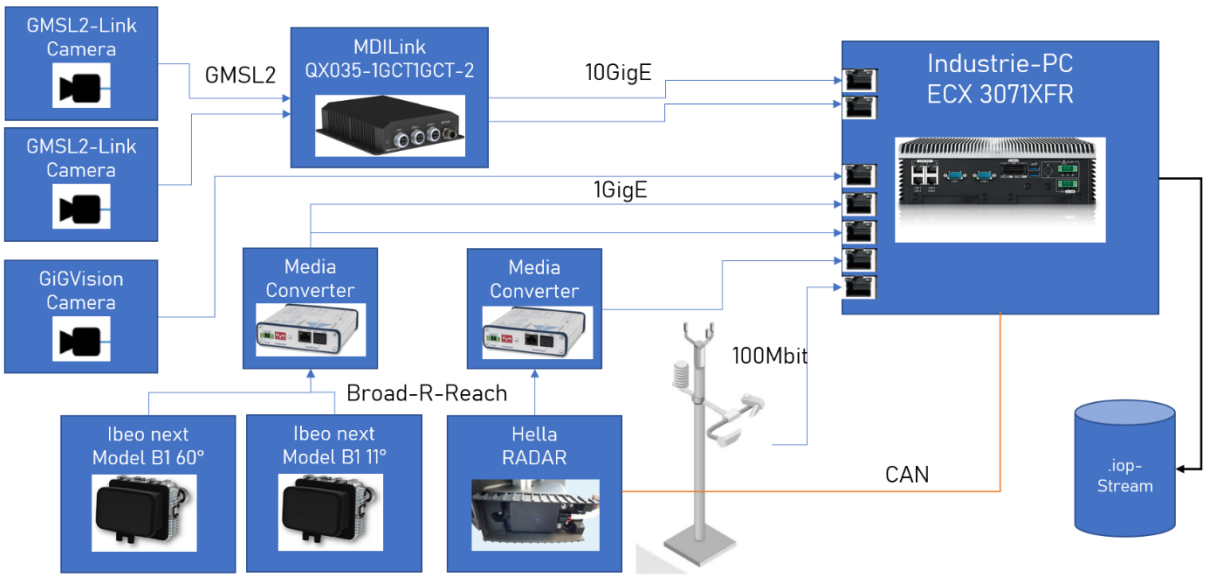

Abbildung 8 Schaubild mit allen Sensoren der Sensorbox und der Straßenwetterstation mit den notwendigen Media-Konvertern und dem ausgewählten Industrie-PC für die Messstelle an der Autobahn

Das Diagramm zeigt, welche Sensorsignale von dem Industrie-PC in der Wetterstations-IPC-Box aufgezeichnet werden sollen. Wir entschieden uns im Projekt-Team die Sensorbox mit den Automotiv-Sensoren (zwei LiDAR-Sensoren, zwei hochauflösende GMSL2-Link-Kameras und ein RADAR-Sensor) nicht weiter zu modifizieren, damit alle drei im Projekt entstandenen Sensorboxen möglichst identisch bleiben. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit der Sensorsignale wichtig, denn nur durch einen identischen Aufbau im Inneren der Sensorboxen können Einflüsse durch evtl. weitere reflektierende Objekte, wie die Gehäuse der Media-Converter ausgeschlossen werden.

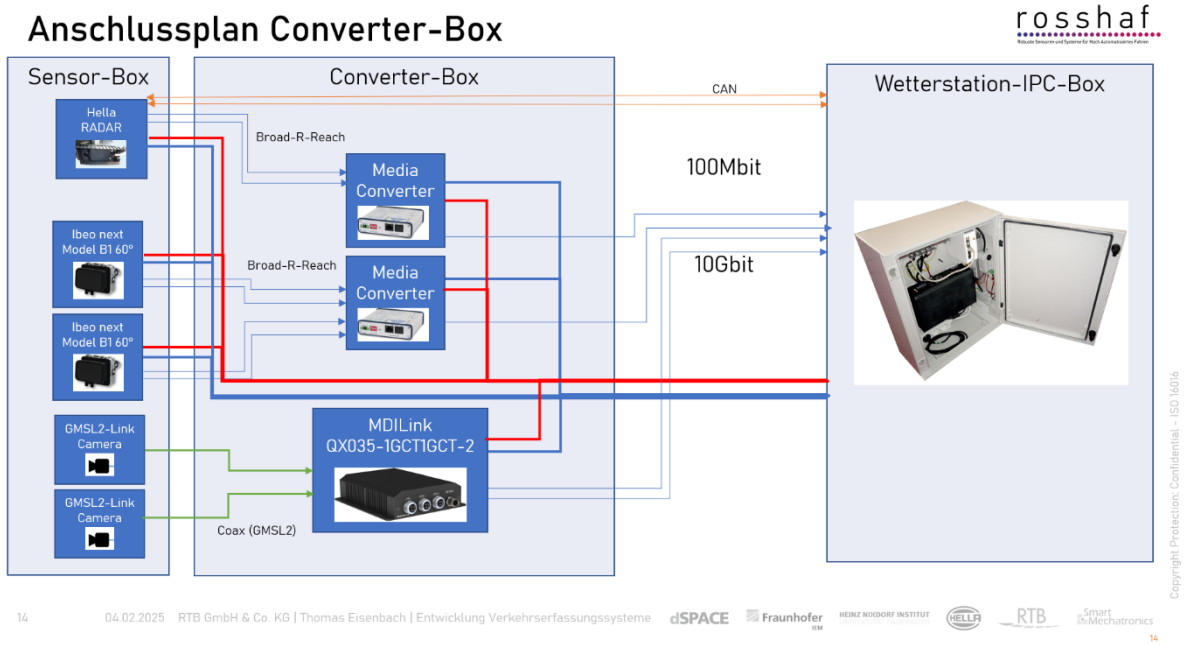

Abbildung 9 Anschlussplan der Converter-Box zur Integration aller Media-Converter und Anbindung an der Wetterstations-IPC-Box

Die beiden LiDAR-Sensoren und der RADAR-Sensor liefern ihre Sensordaten via Automotiv Ethernet (Broad-R-Reach), was in den beiden zweikanaligen Media-Convertern auf 100Mbit-Ethernet umgesetzt wird. Jede Ethernet Leitung ist über wasserdichte Kabeldurchführungen dann mit einer dedizierten Netzwerkkarte des Industrie-PCs im Inneren der Wetterstations-IPC-Box verbunden, die auf zwei verschiedene logische VLANs konfiguriert wurden. Die beiden GSML2-Link-Kameras liefern ihre Bildsignale über Koaxialleitungen an den MDILink, der auch die Kameras mit Spannung versorgt. Die Bildsignale werden vom MDILink über zwei 10Gbit-Ethernet-Leitungen an die beiden dedizierten 10Gbit-LAN-Ports des Industrie-PC geführt. Für die korrekte Funktion des RADAR-Sensors von Hella muss dieser eigentlich an einen Fahrzeug-CAN-Bus angeschlossen sein, über den die Ego-Motion-Daten des Fahrzeugs, wie Geschwindigkeit, Gier-Rate, etc. übertragen werden. Daher musste auch eine CAN-Busleitung von der Wetterstations-IPC-Box zu der Converter-Box vorgesehen werden. Per Software wurde zum Systemstart dann eine bestimmte CAN-Nachricht mit den erwarteten Ego-Motion-Daten versendet, damit der RADAR-Sensor mit der Ausgabe seiner Objektlisten und Punktewolken beginnt.

Neben allen Signalleitungen, mussten auch alle Converter und die Sensoren in der Sensorbox mit Spannung (12V Gleichspannung wie im KFZ-Bordnetz üblich) versorgt werden.

Es entstand ein Konzept, bei dem unter der Sensorbox eine Konverter-Box angebracht wurde, in der die notwendigen Media-Converter für die beiden LiDAR-Sensoren und den RADAR-Sensor, sowie die beiden GSML2-Link-Kameras untergebracht wurden.

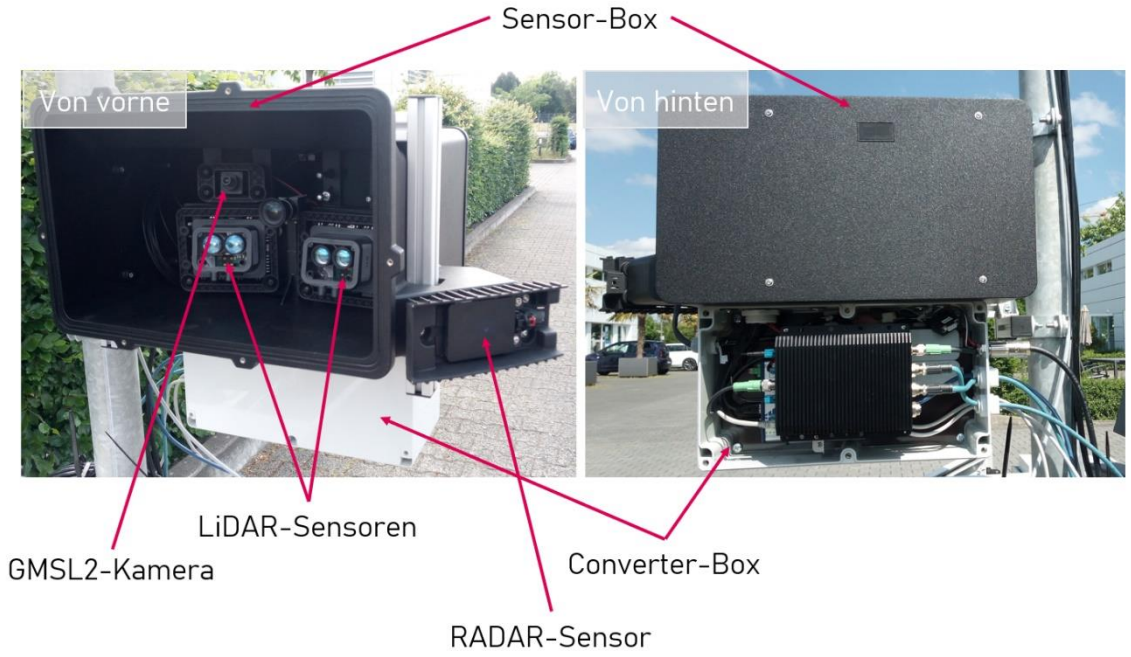

Abbildung 10 Fotos der fertigen Sensor-Box mit den LiDAR- Sensoren, den Kameras und dem RADAR-Sensor und die Integration der Converter-Box auf dem Werksgelände von RTB

Für die notwendige Leitungsdurchführung wurden wasserdicht verschlossene Bohrungen in Sensorboxunterseite und Converter-Box-Oberseite eingelassen.

Nachdem alle Sensorsysteme in den Gesamtaufbau integriert waren, wurde der gesamte Aufbau an einem mobil aufstellbaren Masten auf dem Werksgelände bei RTB

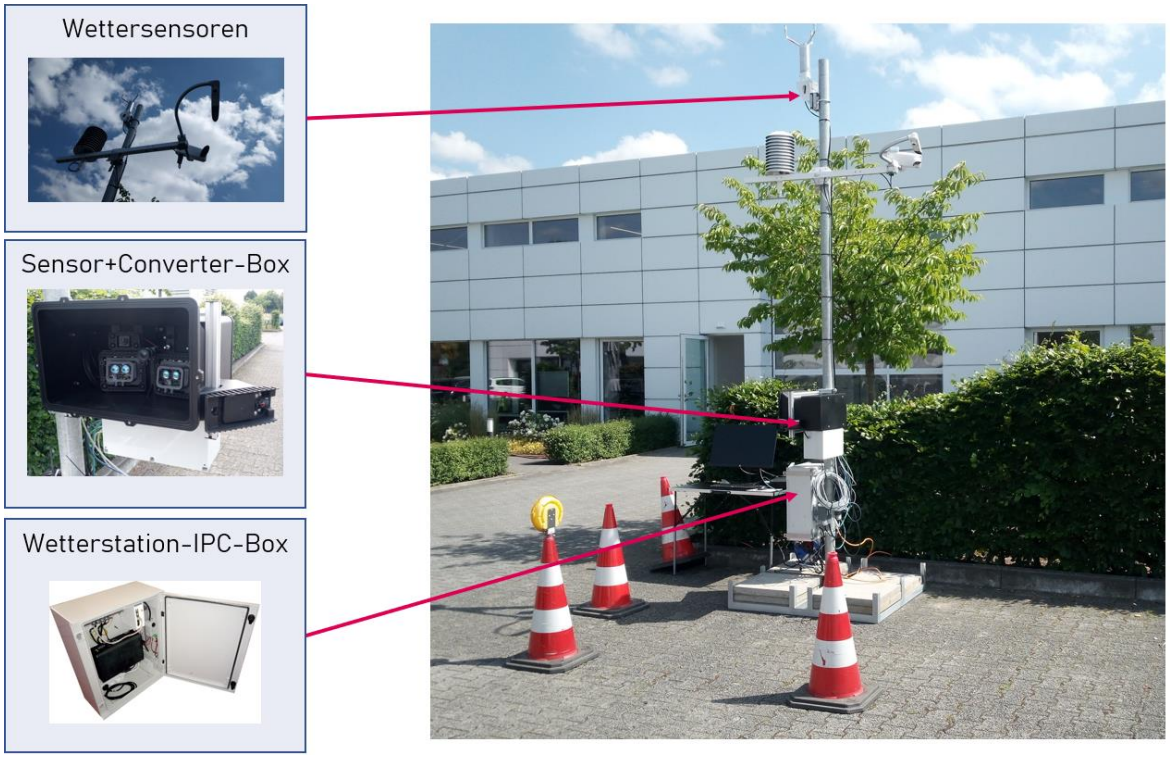

Abbildung 11 Die fertiggestellte ortsfeste Sensorplattform für die Messstelle an der Autobahn aufgestellt für den Probebetrieb auf dem Werksgelände bei RTB

in Bad Lippspringe montiert und erstmalig in Betrieb genommen. Beim Konsortial-Meeting am 15.6.2023 wurde er den Kooperationspartnern und dem Gutachter vom Projektträger vorgestellt.

Der Aufbau auf dem Werksgelände wurde dann für Tests der Framework-Software IoProc mit den neuen Plugins für die Kameras und die LiDAR-Sensoren sowie der RADAR-Daten des Hella-RADAR-Sensors, der Wetterdaten und der NMEA-Daten des integrierten GPS-Empfängers im Industrie-PC genutzt.

AP3.7 Installation der Messstelle an der A33

Nach umfangreichen Tests und letzter Bug-Fixes in verschiedenen Software-Modulen wurde das gesamte Sensorsystem Anfang 2024 demontiert und an der geplanten Messstelle an der A33 installiert.

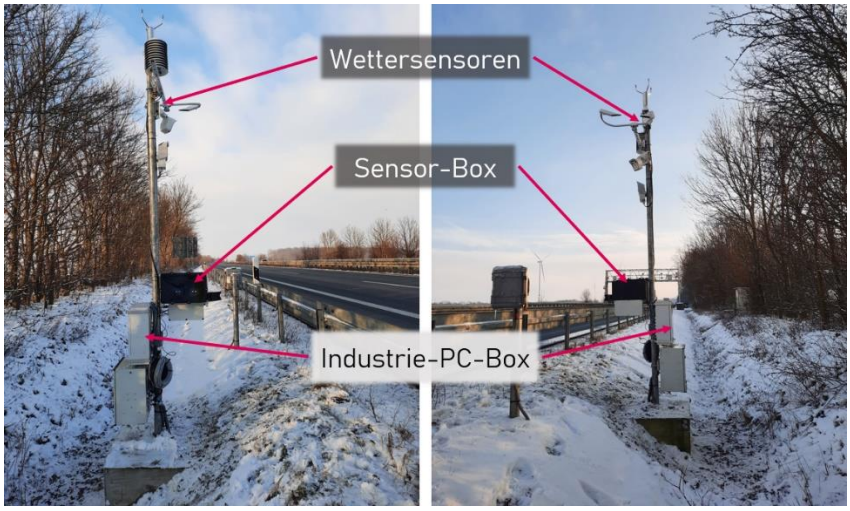

Abbildung 12 Fotos von der installierten ortsfesten Sensorplattform der Messstelle an der A33 im Winter 2023/2024

Vor Ort mussten die Sensoren so justiert werden, dass sie einen möglichst großen Teil der Fahrbahn erfassen, damit sich ein möglichst großer Überlappungsbereich mit den Sensoren der mobilen Sensorplattform bei der Vorbeifahrt ergibt.

Neben der aufwändigen Messstation an der Autobahn wurden zwei weitere Stationen mit reduzierter Sensorik ausgestattet aufgebaut.

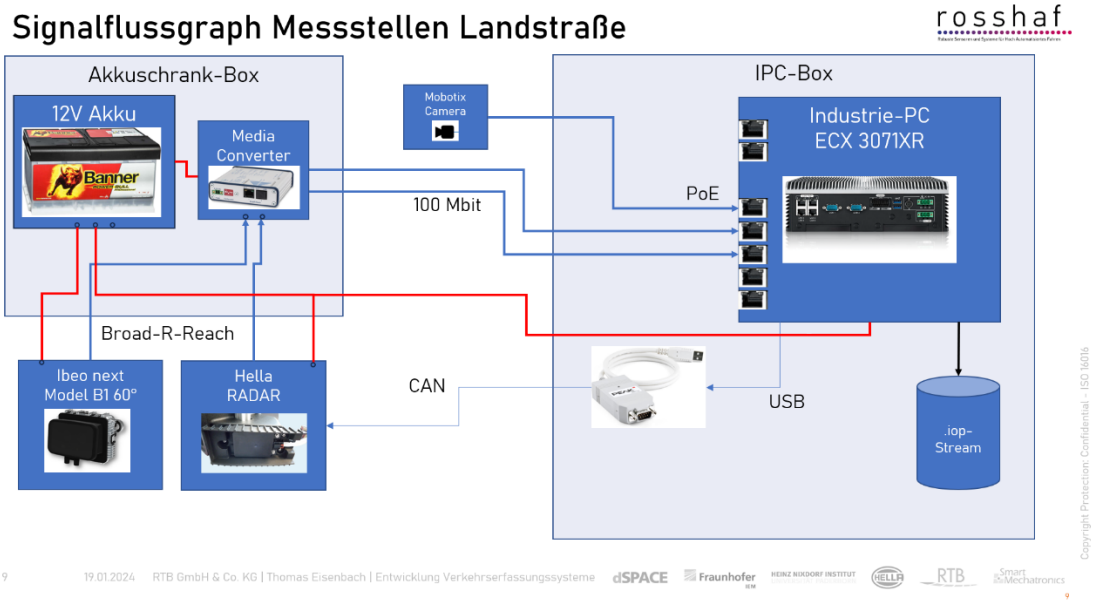

Abbildung 13 Plan für Signalfluss und Spannungsversorgung der Systeme für die Messstellen an den Landstraßenabschnitten

Sie bestehen aus einer Industrie-PC-Box, einem LiDAR-Sensor für den Nahbereich mit 60° horizontalem Öffnungswinkel, einer IP-Web-Cam, die ganz oben am Mast montiert wird und Verifikationszwecken dient und einem Akkukasten, der den 100Ah-Akku für den Netz-autarken Betrieb und den Media-Converter aufnimmt. Für eine Station war auch ein Hella-RADAR eingeplant worden.

AP3.8 Installation der Messstellen an den Landstraßenabschnitten

Abbildung 14 Installationsarbeiten an der Messstelle Parkplatz am Streckenabschnitt T3

Am beiden Landstraßenabschnitten T3 und T4 wurden Bodenhülsen für die Masten gesetzt. Diese ermöglichen einen geringen Aufwand beim Aufstellen der Messtationen für die Messfahrten und gewährleisten einen sicheren Stand.

Abbildung 15 Installationsarbeiten an der Messstelle Baumallee

AP3.9 Festlegung der Referenzziel-Schilder

Im Verlauf des Projekts im Konsortium wurde entschieden für die verschiedenen Sensortypen (insbesondere für die Kameras und LiDAR-Sensoren) spezielle Referenzziele zusätzlich zu bereits vorhandenen Bauwerken aufzustellen mit einer definierten Reflektivität und Form in festen definierten Abständen zu den Sensoren. Für die LiDAR-Sensoren wurde ein rundes Schild mit einem Durchmesser von 60cm und einer homogenen matten Lackierung mit einem Grauton in Auftrag gegeben. Für die Kamera wurde ein Siemensstern auf einem ebenfalls runden Schild mit 60cm Durchmesser beauftragt.

Abbildung 16 Die angefertigten Referenzschilder an der Messstelle A33. Oben der „Siemensstern" für die Kameras, unten das Referenzziel für die LiDAR-Sensoren

Die Abbildung zeigt beide Referenzmarken nach der Installation am Standort A33. Das untere Schild als Referenzmarke für die LiDAR-Sensoren befindet auf einer Höhe von 1,40m gemessen von der Schildunterkante zum Boden.

Da an der Messstelle an der Autobahn die Sensorbox mit den beiden LiDAR-Sensoren und den beiden GMSL2-Kameras installiert war, die alle andere Erfassungsbereiche aufweisen, stellte die Bestimmung einer idealen Position für die Referenzmarken die größte Herausforderung dar.

Abbildung 17 Festlegung und Vermessung der Position der Referenzschilder an der Messstelle A33

Die Referenzschilder sollten in allen vier Sensordaten der optischen Sensoren erkennbar sein. Daher wurde entschieden neben der Vorabplanung vorsichtshalber auch vor Ort mit Sicht auf die Live-Datenvisualisierung von IoProc eine ideale Position für die Schilder zu finden. Es zeigte sich, dass die Größe der Referenzmarken in den Punktewolken bei einem Abstand von mehr als 10m zu klein ist.

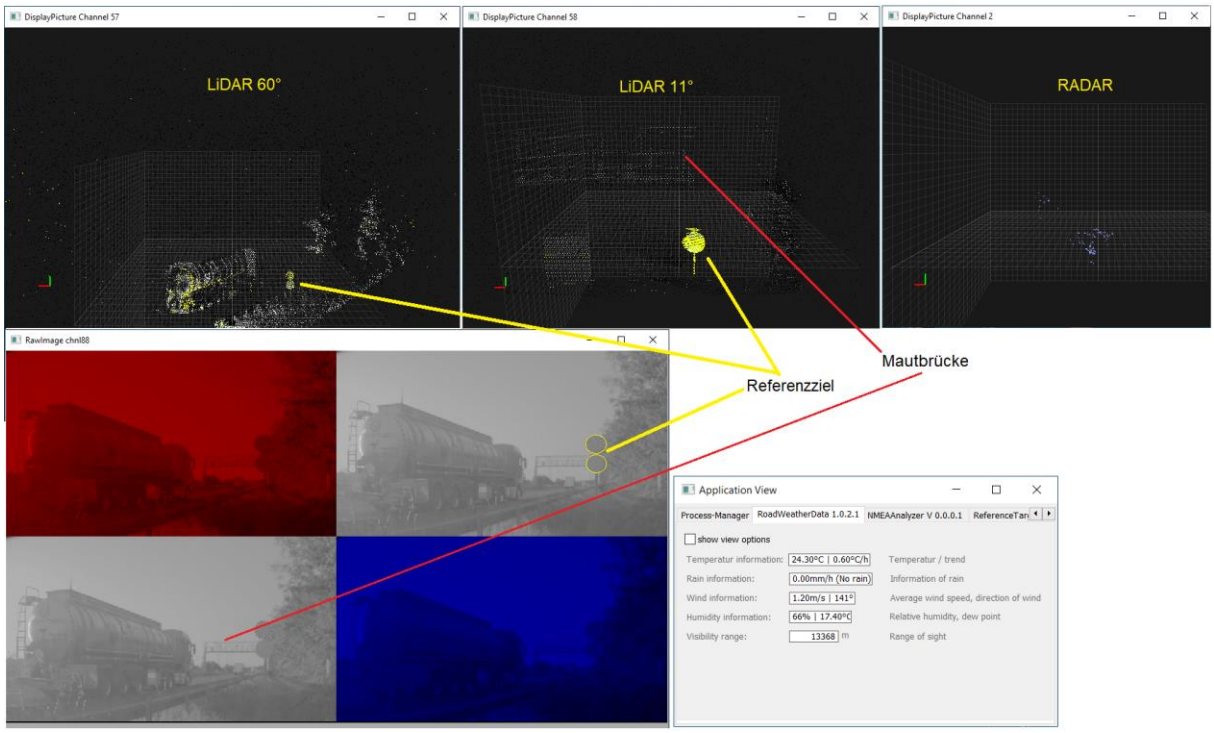

Abbildung 18 Screenshot der Sensordatenvisualisierung in der Software IoProc beim Probebetrieb an der Messstelle A33

In der Abbildung ist die Visualisierung der Sensor-Daten in der Software IoProc zu sehen. Linksoben werden die Punktewolken des 60°-LiDAR-Sensors dargestellt. Das darstellende Plugin zeigt die Intensitätswerte jedes Punktes in Grauwertstufen dar. Sehr große Intensitäten werden in gelber Farbe dargestellt. Man kann das Referenzschild am rechten

Fahrbahnrand erkennen. Im Dialogfenster rechts daneben wird die Punktewolke des 11°-LiDAR dargestellt. Hier ist das Referenzschild deutlich größer zu erkennen und auch die Mautbrücke ist gut erkennbar. Das Dialogfenster ganz rechts oben zeigt die Punktewolken des Hella-RADAR. Darunter sind links die Bilddaten der GSML2-Kamera für den Nahbereich in RCCB-Kodierung zu sehen. Im Dialogfenster rechts daneben werden die aktuellen Messwerte der Straßenwetterstation angezeigt.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Position der Referenzmarken an allen drei Standorten.

Abbildung 19 Fotos aller drei Messstellen der ortsfesten Sensorplattform mit den installierten Referenzschildern

Im Februar 2024 war der Aufbau der ortsfesten Sensorplattform (AP3) abgeschlossen und die im Arbeitspaket AP4 geplanten Testfahrten mit Sensordatenaufzeichnungen konnten in enger Abstimmung mit dem Kooperationspartner Hella beginnen.

AP4. Datenerhebung - Erhebung Messdaten und Generierung simulierter Daten

Das Erheben realer Messdaten konnte aufgrund der Verzögerung in AP2 und AP3 erst Anfang 2024 beginnen. Dies wurde in enger Abstimmung mit dem Kooperationspartner Hella durchgeführt. Während seitens Hella die Verfügbarkeit des Versuchsfahrzeugs als Träger der mobilen Sensorplattform im Vorfeld geklärt sein musste, bestand bei RTB die Herausforderung in der Planung des notwendigen Personals und eines geeigneten Transportfahrzeugs für die Installation und Inbetriebnahme der beiden temporären Messstellen an den Landstraßenabschnitten T3 und T4. Die Sensorik für diese beiden Standorte ist jeweils fest an einem Mast montiert, damit keine erneute Justage vor Ort stattfinden muss. Dies ist aus Gründen der Vergleichbarkeit der Messdaten verschiedener Aufzeichnungen zwingend erforderlich. Aus diesem Grund mussten an einem geplanten Messfahrttag mit den über 3m langen Masten zu den jeweiligen Standorten gefahren werden und diese dort in die entsprechend markierten Bodenhülsen gesetzt werden. Dann mussten die Akkus aufgerüstet und das System manuell gestartet werden. Sobald das System gestartet war, wurde dies vom Montage-Team vor Ort telefonisch an Kollegen bei RTB gemeldet, so dass ein Mitarbeiter die Fernsteuerung des Systems per Remote-Verbindung überprüfen konnte. Da die Messstelle an der Autobahn A33 dauerhaft betrieben werden konnte, entfiel der Installations- und Inbetriebnahme Aufwand hier.

Sobald das Fahrzeug von Hella nach seiner Anfahrt von Lippstadt die Teststrecke erreicht hat, wurde dies telefonisch bei RTB mitgeteilt, so dass die Aufzeichnungen auf allen drei Messstellen-Systemen manuell per Fernsteuerung gestartet und überwacht wurden. Auf diese Weise konnte zum einen schnell auf evtl. auftretende Störungen einzelner Sensorsysteme reagiert werden. Zum anderen konnte so die Menge der aufgezeichneten Daten auf ein notwendiges Minimum reduziert werden. Dies spielte insbesondere bei den sehr umfangreichen Daten der vollausgestatteten Messstelle an der Autobahn eine große Rolle.

An einem Messtag wurden meist mehrere Messfahrten durchgeführt, die beginnend bei Abschnitt T4 der Teststrecke an der Messstelle an der Baumallee vorbei in Richtung Etteln dann an der Messstelle Parkplatz am Abschnitt T3 vorbei über Kirchborchen und am Abschnitt T1 an der Messstelle A33 zurück zum Ausgangspunkt führten.

Im Anschluss an die Messfahrten musste die Sensorik an den beiden temporären Messstellen wieder abgebaut und zurück zum Standort bei RTB transportiert und so eingelagert werden, dass sie schnell wieder einsetzbar ist. Außerdem wurden die aufgezeichneten Daten von allen Systemen auf externen Festplatten gespeichert und an den Kooperationspartner Fraunhofer IEM in Paderborn übergeben, wo sie dann entsprechend in das S3-Cloud-Storage abgelegt und bei Bedarf in ein einheitliches Datenaustauschformat konvertiert wurden.

Neben den koordinierten Aufzeichnungen während der Messfahrten mit der mobilen Sensorplattform wurden an der Messstation an der Autobahn auch unabhängig Aufzeichnungen bei interessanten Wetterbedingungen erstellt.

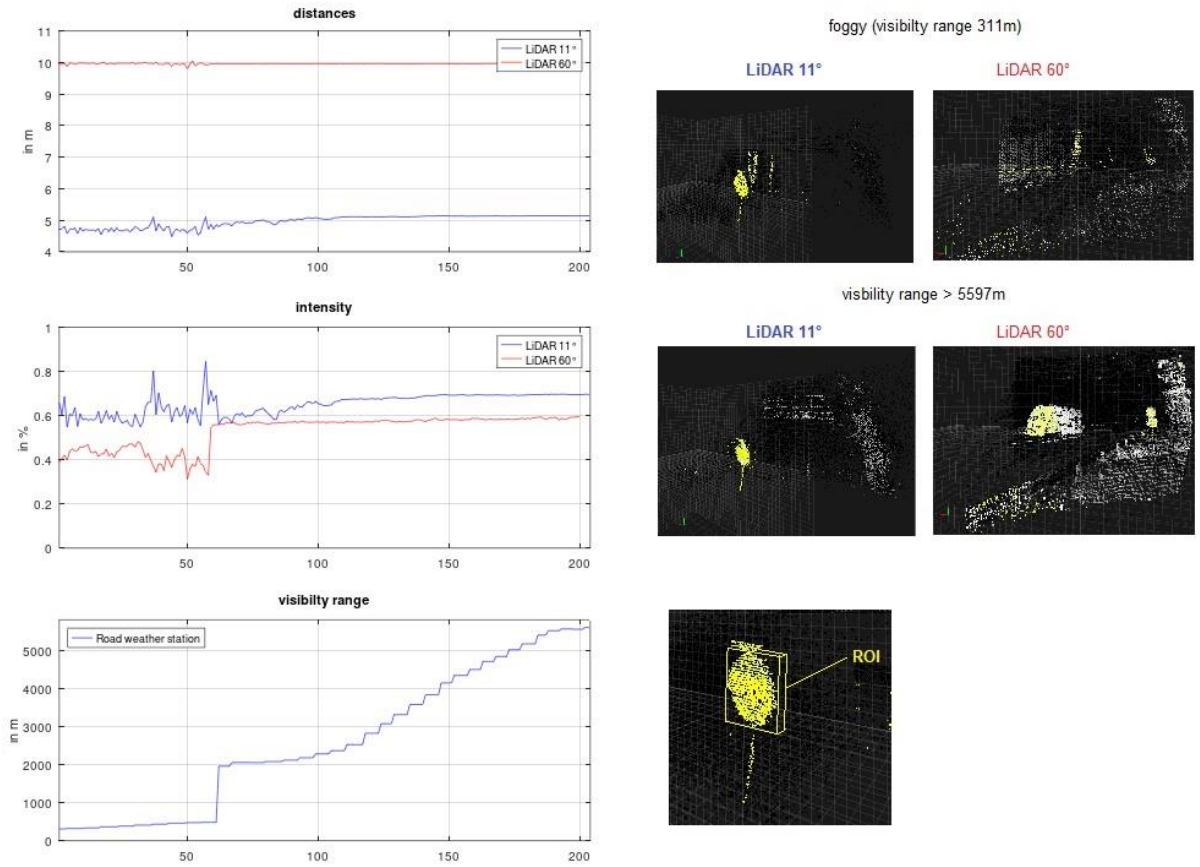

Abbildung 20 Gemessene Abstandswerte und Intensitätswerte der beiden LiDAR-Sensoren im Bereich des Referenzziels bei verschiedenen Sichtweiten

Die Abbildungen zeigen die gemessenen Abstandswerte (oberes Diagramm) und die gemessenen Intensitätswerte (Mitte) der beiden LiDAR-Sensoren bei einer Sequenz von etwa 200 Aufzeichnungen mit sich auflösendem Morgennebel am 5. September 2024. Im unteren Diagramm sind die Sichtweiten der Straßenwetterstation zu sehen. Man erkennt einen deutlichen Sprung in der gemessenen Sichtweite etwa nach der 60. Aufzeichnung. Hier gab es aus organisatorischen Gründen eine etwa einstündige Pause vor Start der neuen Aufzeichnungssequenz. In dieser Zeit hatte sich der Morgennebel schon bis zu einer Sichtweite von fast 2000m aufgelöst.

Für die Auswertung wurden die Punkte innerhalb des kleinen ROIs (dreidimensionaler Quader um die Punkte des Referenzziels, siehe Abbildung unten rechts neben Diagramm mit den Sichtweiten) verwendet. Dabei wurden die Abstandswerte aller Punkte innerhalb des ROIs zu jedem Abtastzeitpunkt örtlich gemittelt und diese Werte zusätzlich über 100 Abtastungen zeitlich gemittelt, um den Einfluss von Verwirbelungen der Nebel Tröpfchen durch vorbeifahrende LKW zu minimieren.

Man erkennt in den Visualisierungen der Punktewolken in den Abbildungen rechts, dass die Gitterstruktur der mehr als 200m entfernten Mautbrücke vom 11° Fernfeld-LiDAR anfangs bei einer gemessenen Sichtweite von ca. 300m nicht mehr detektiert wurde. Zum Ende der Sequenz bei einer Sichtweite von mehr als 5km wird sie wieder sicher detektiert.

Während die Intensitätswerte innerhalb des Mess-ROI bei den nebeligen Aufzeichnungen mit einer Sichtweite unter 500m einigen Schwankungen unterliegen, scheinen die gemessenen Abstandswerte bei beiden LiDAR-Sensoren davon unabhängig nahezu konstant zu sein. Auffällig war bei den Analysen, dass der Fernbereichs-LiDAR mit einem horizontalen Öffnungswinkel von 11° das Referenzziel in einem Abstand von nur 5m statt der tatsächlichen 10m gemessen hat. Hier scheint eine sensorinterne Kalibrierung nicht korrekt eingestellt zu sein.

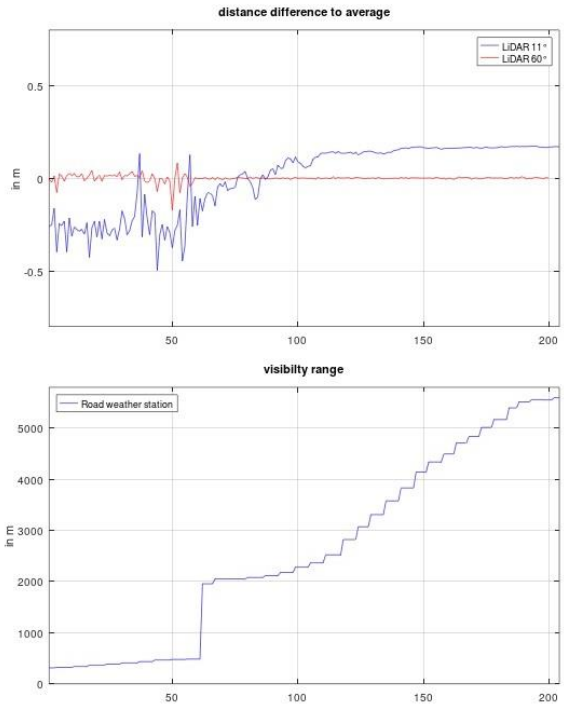

Abbildung 21 Abweichung der Abstandswerte auf das Langzeitmittel bei verschiedenen Sichtweiten

Betrachtet man die Abweichungen der ermittelten Abstandswerte der beiden Sensoren zum Mittelwert über alle Aufzeichnungen, so erkennt man, dass diese beim 11°-LiDAR deutlich stärker abhängig von der Sichtweite ausfallen als beim 60°-LiDAR.

Da für einen Detektionsalgorithmus neben dem Abstandsfehler auch die ermittelbare Dimension eines Objektes eine wichtige Rolle spielt, wird im folgenden Diagramm die Anzahl Punkte, die von den Sensoren innerhalb des Referenzziels detektiert wurden, visualisiert.

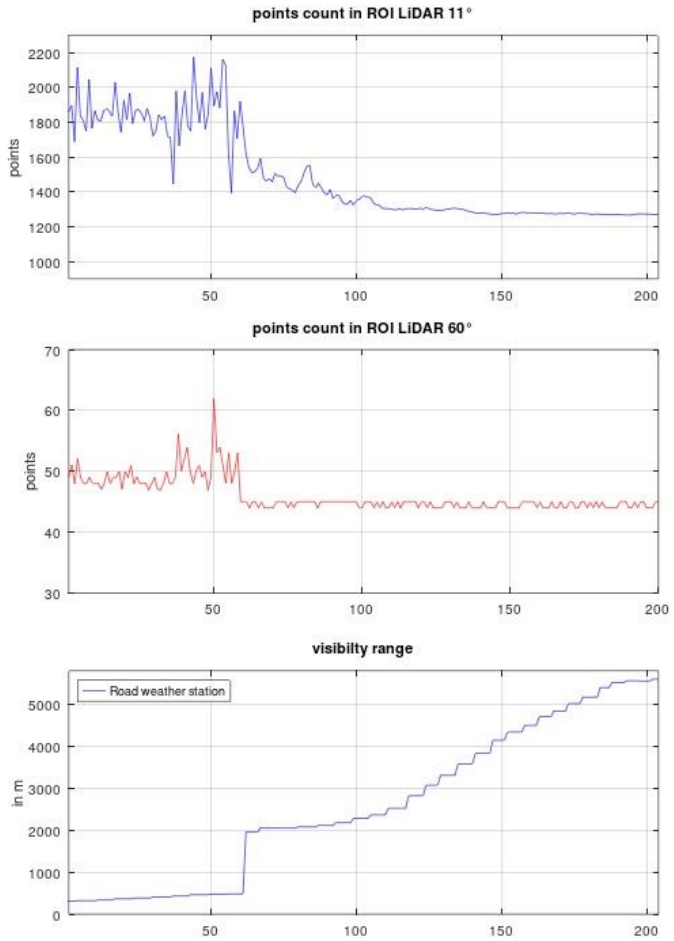

Abbildung 22 Anzahl Detektionspunkte im Bereich des Referenzziels bei verschiedenen Sichtweiten

Zunächst kann festgestellt werden, dass der 11°-LiDAR das Referenzziel mit deutlich mehr Punkten erfasst als der 60°-LiDAR, was durch die Unterschiede bei der verwendeten Optik der Sensoren begründet ist. Auch hier schwankt die Anzahl der Punkte bei geringen Sichtweiten deutlich stärker als bei großen Sichtweiten. Bemerkenswert ist, dass offensichtlich die Anzahl Punkte im Bereich des ROI am Referenzziel bei Nebel größer ist als bei guter Sicht. Die Ursache dafür könnten Phantompunkte ausgelöst durch Nebeltröpfchen vor dem Referenzschild sein. Grenzt man in der Analyse den Bereich des ROIs in der entsprechenden Koordinate deutlich ein, entfallen viele Punkte, die von den Sensoren vor oder hinter dem Schild durch Nebelteilchen detektiert wurden und die Anzahl Punkte bleibt nahezu konstant. Entsprechend bleibt auch der gemessene Abstandswert nahezu konstant. In der Praxis kann ein Detektionssystem diese Art der Korrektur jedoch nicht durchführen, da ihm die tatsächliche Position eines zu detektierenden Objekts nicht bekannt ist.

AP8. Maßnahmen zur Robustheitssteigerung

Neben den Sensordaten der Sensorbox wurden auch Seiten-Radar-Systeme für das Verkehrsmonitoring am Standort an der Autobahn eingesetzt und getestet. Diese Systeme erfassen mit einem 24GHz-Radar-Frontend, das in 45° zur Fahrbahn ausgerichtet ist, die vorbeifahrenden Fahrzeuge. Dabei ist das Gerät ca. 60cm hinter der rechten Leitplanke positioniert.

Abbildung 23 Kamerabild der Überwachungskamera an der Messstelle an der Autobahn mit Zählgerät hinter der Leitplanke

Die Abbildung zeigt das Zählgerät in der grauen Box im unteren linken Bildbereich an der Messstelle an der Autobahn A33 aus Sicht der Überwachungskamera. Die Aufzeichnungen der Sensordaten dieses Gerätes wurden im Rahmen des RoSSHAF-Projektes genutzt, um den Einfluss verschiedener Wetterszenarien auf die Robustheit der Klassifikationsraten der Fahrzeugdetektion zu ermitteln. Die Signalverarbeitung des Verkehrs-Monitoring-Systems basiert auf der Auswertung der RADAR-Signale im Frequenzbereich. Im Folgenden ist die FFT der Vorbeifahrt verschiedener PKWs bei trockenem Wetter dargestellt.

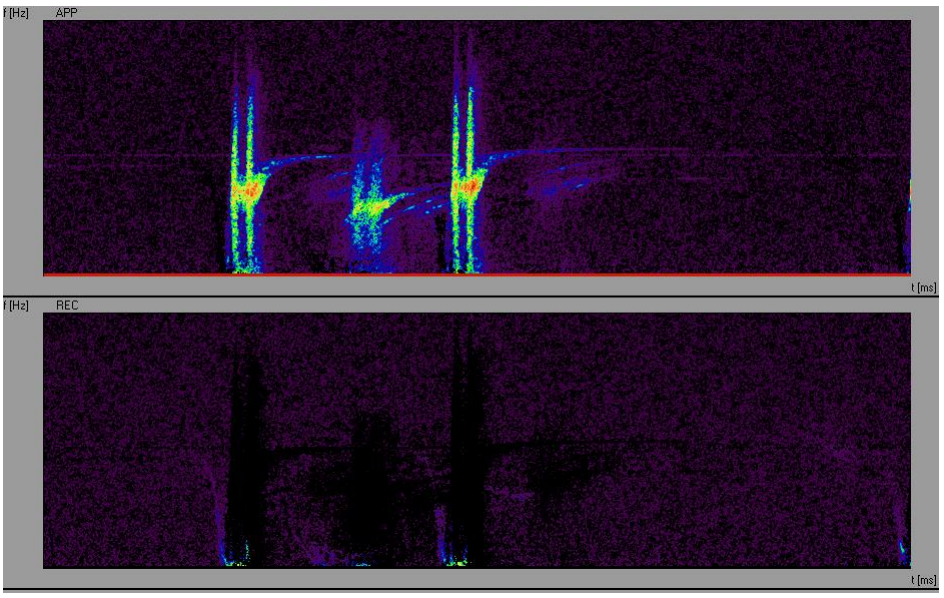

Abbildung 24 FFT-Wasserfalldiagramme zufahrender (APP) und wegfahrender (REC) Fahrzeuge bei trockenen Wetterbedingungen

Im oberen Bereich des Diagramms (APP=approaching) sieht man die FFT aller zufahrenden Objekte, während im unteren Bereich (REC=receding) die der wegfahrenden Objekte dargestellt wird. Auf der horizontalen Achse werden die neuesten Daten von links geschrieben. Die älteren Daten verschieben sich dabei mit jedem neuen Sample nach rechts, bis sie das Diagramm verlassen. Auf der vertikalen Achse sind die verschiedenen Frequenz-Bins (256 pro Richtung) der FFT aufgetragen. Jeder Frequenz-Bin entspricht einer Geschwindigkeit von etwa 1,5 km/h. Die Farbe entspricht der jeweils gemessenen Amplitude des empfangenen reflektierten RADAR-Signals, wobei dunkle Blautöne einer geringen Amplitude und orange-rote einer hohen Amplitude entsprechen. Das RADAR-System ist sehr robust gegenüber optischen Einflüssen wie Sonneneinstrahlung oder Nebel. Es zeigt sich jedoch, dass starker Regen als Störungen in der FFT auftaucht.

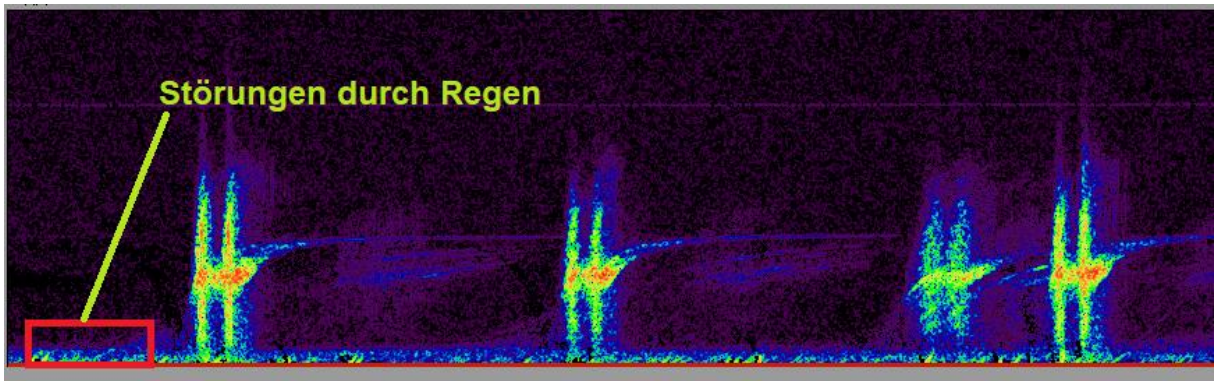

Abbildung 25 FFT-Wasserfalldiagramm von Szene mit vier Fahrzeugen bei Regen

Im unteren Bereich des Diagramms, das bei Regen entstand, erkennt man nun viele in zufälligem Muster aufeinander folgende Störungen, die nur wenige Geschwindigkeits-Bins hoch sind. Diese Störungen werden durch die fallenden Regentropfen ausgelöst. Eine Analyse dieser Störsignale ergab außerdem, dass die Abstandswerte der meisten dieser Signale im Nahbereich (bei einem radialen Abstandswert <0,7m) liegen und nicht mehr als 10 Bins hoch sind.

Im Rahmen des RoSSHAF-Projektes wurde als robustheitssteigernde Maßnahme ein Regenfilter-Algorithmus implementiert, der Signale, die im Nahbereich des Sensors detektiert wurden, entfernt und die verbliebenen nur wenige Bins der FFT belegenden Störsignalanteile einer weiteren Plausibilitätsprüfung basierend auf der Analyse mehrerer Geschwindigkeits-Bins der FFT aus benachbarten Samples unterzieht. Als unplausibel gelten hier Signale, die aufeinanderfolgend keine sinnvolle Clusterung ergeben. So verhindert die Plausibilitätsprüfung ein Entfernen der Signalanteile, die zu einem sehr langsam fahrenden Objekt gehören könnten und dann nicht mehr klassifiziert werden.

Durch diese Maßnahme konnten die Klassifikationsraten invariant gegenüber Starkregenereignissen und das Verkehrs-Monitoring-System damit robuster gemacht werden.