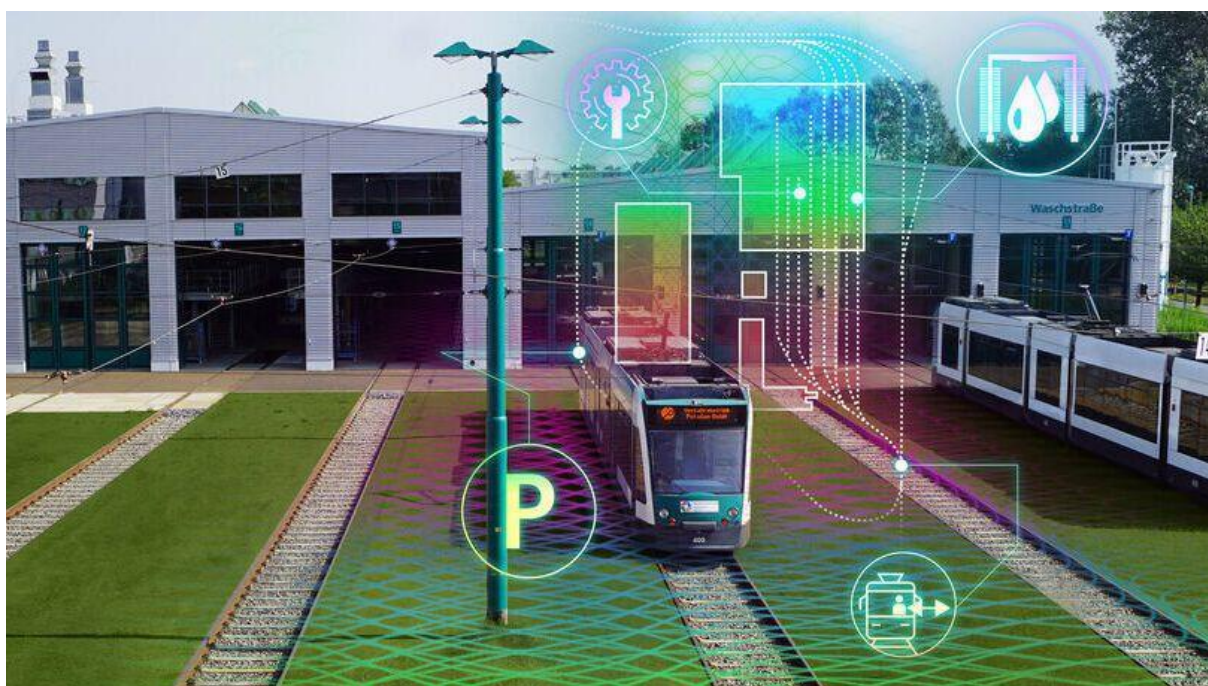


# Schlussbericht

## AStriD – Autonome Straßenbahn im Depot

**Vorhabenbezeichnung:**

AStriD – Autonome Straßenbahn im Depot

**Laufzeit des Vorhabens:**

Oktober 2019 – Dezember 2022

**Zuwendungsempfänger:**

Siemens Mobility GmbH

Codewerk GmbH

ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH

Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

**Förderkennzeichen:**

19F2104A

19F2104B

19F2104D

19F2104E

19F2104F

## Inhaltsverzeichnis

---

Zusammenfassung .....	3
Durchgeführte Arbeiten und ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse .....	4
AP 1: Spezifikation und Konzeption.....	4
AP2: Realisierung .....	7
AP3: Integration und Erprobung .....	51
AP4: Übertragbarkeit und Bewertung.....	56
AP5: Öffentlichkeitsarbeit .....	64
AP6: Projektmanagement.....	66
Nutzen, Verwertbarkeit und allgemeine Übertragbarkeit.....	67
Daten in der mCLOUD .....	67
Übertragung der im Projekt gewonnen Erkenntnisse auf andere Schienenfahrzeuge .....	67
Verwendung der Projektergebnisse in weiteren Folgeprojekten.....	68
Kommerzielles Potential des autonomen Fahrens im Schienenverkehr sowie Beitrag der Projektergebnisse zur eigenen Marktposition in diesem Bereich.....	68
Fazit und Ausblick .....	69
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	70
Wichtigste Punkte des zahlenmäßigen Nachweises .....	71
Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Durchführung des Vorhabens	72
Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	73
Codewerk GmbH .....	73
Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität (IKEM).....	73
Siemens Mobility GmbH .....	73
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) .....	74
ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH .....	74
Anhang .....	76

## Zusammenfassung

---

Das mFund-Projekt „AStriD – Autonome Straßenbahn im Depot“ wurde von 2019 bis 2022 unter Beteiligung der Partner Siemens Mobility GmbH, Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM), Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), der Codewerk GmbH und ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH durchgeführt.

Es zielte darauf ab, die Vollautomatisierung eines Straßenbahndepots auf Basis von autonom fahrenden Trams und eines digitalen Betriebshofes zu konzipieren und autonome Servicefahrten praktisch umzusetzen. Dafür war ein Konzept für die Digitalisierung eines Betriebshofes mit dem Schwerpunkt der datentechnischen Vernetzung aller an der Automatisierung beteiligten Komponenten (Steuerungssoftware, Anlagen und Fahrzeuge) zu erarbeiten und prototypisch die technische Umsetzung für wesentliche Datenbasiskomponenten und die Realisierung von ausgewählten Fahrscenarien auf Basis der autonom fahrenden Tram durchzuführen. Weiterhin zählte die Demonstration der technischen Machbarkeit sowie die Untersuchung des weiteren wissenschaftlich, technischen und rechtlichen Handlungsbedarfs, auch bezüglich Datenqualität und -verfügbarkeit, Datenzugriff und Datenschnittstellen zur Aufgabenstellung des Projekts.

Das Projekt wurde unter Beteiligung der Partner Siemens Mobility GmbH, Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM), Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Codewerk GmbH und ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH geplant und im o.g. Zeitraum mithilfe eines Demonstrators auf dem Betriebshof der ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH in Potsdam durchgeführt. Das Konsortium wurde unter der Maßgabe sich ergänzender Expertise auf unterschiedlichen Entwicklungs- und Forschungsgebieten gebildet und hatte zudem die Vereinigung unterschiedlicher Unternehmensgrößen und -strukturen – vom KMU bis hin zum global agierenden Großunternehmen – zum Vorteil. Es vereint zudem Flexibilität und kurze Entscheidungswege mit Leistungsfähigkeit und breit aufgestelltem Know-how. So fanden Industrie, Wissenschaft und Anwender im Projekt zusammen, um ihre jeweiligen Erfahrungen und Sichtweisen einzubringen.

Zur Strukturierung ist das Projekt in die sechs Arbeitspakete „Spezifikation und Konzeption“, „Realisierung“, „Integration Gesamtsystem und Erprobung“, „Übertragbarkeit und Bewertung“, „Öffentlichkeitsarbeit“ sowie „Projektmanagement“ untergliedert, die im nachfolgenden Kapitel inklusive ihrer Ergebnisse eingehender beschrieben werden. Die sich anschließenden Kapitel bieten einen Überblick zur Dissemination, Anschluss- und Verwertungsfähigkeit des Projekts, sowie förderrechtlichen Aspekten und den Herausforderungen während der Projektlaufzeit.

# Durchgeführte Arbeiten und ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse

## AP 1: Spezifikation und Konzeption

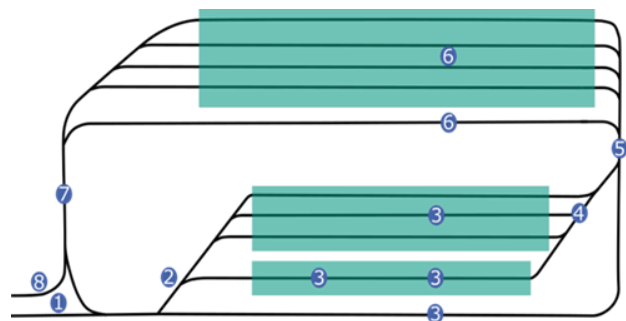
### Kurzbeschreibung des Arbeitspaketinhalts

In diesem Arbeitspaket wurden die Prozesse und Vorgänge auf dem Betriebshof der ViP in Potsdam analysiert, formalisiert und auf Automatisierung bewertet. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf mögliche Herausforderungen in Bezug auf die Automatisierbarkeit gelegt. Auf Basis von Teilprozessen wurde ein für die Umsetzung geeigneter Use-Case erarbeitet, welcher sich aus einzelnen automatisierbaren Teilprozessen mit unter anderem hohem wirtschaftlichem Potential zusammensetzt. Zusätzlich konnte durch die Erstellung eines Anforderungskataloges die Anforderungen an einen digitalen Betriebshof spezifiziert werden.

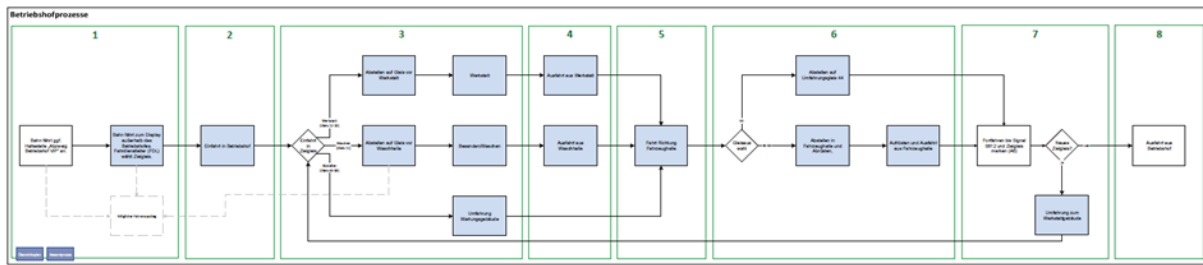
### Darstellung der Ergebnisse

Die etablierten Prozesse der Betriebsbereitmachung des Potsdamer Depots wurden zunächst analysiert und dokumentiert. Zur Dokumentation der Ergebnisse wurde dabei Wert auf Formalismen und standardisierte Beschreibungsmethoden gelegt. Auf diese Weise sind neben einem übergreifenden Ablaufdiagramm auch verschiedene Swimlanediagramme, als Teil der Unified Modeling Language (UML), zur Beschreibung von Use Cases entstanden (Meilenstein M1 01/2020).

Abbildung 1 zeigt eine abstrahierte Darstellung des Potsdamer Betriebshofes, inklusive Andeutungen der Gleisverläufe und, in grün hervorgehoben, die für die Prozesse notwendigen Gebäude. Darunter die Abstellhalle, die Werkstatträumlichkeiten und die Servicehalle (Besandungs- und Waschprozess). Die in der Abbildung gezeigten Ziffern beziehen sich dabei auf die jeweiligen Prozessschritte im Gesamtprozessablauf der Betriebsbereitmachung (Abbildung 1, Tabelle 1). Dabei konnte der Prozessablauf in acht Teile unterteilt werden. Bei Einfahrt auf den Betriebshof wird dem Fahrer ein Zielgleis zugeteilt (1, 2). Auf Basis dieses Zielgleises kann der Fahrer per Augenschein die korrekte Einstellung der Weichen kontrollieren. Nach Ankunft auf dem Zielgleis übergibt der Bahnfahrer die Straßenbahn in die Zuständigkeit des Depots und dessen Mitarbeiter. Dies geschieht entweder direkt vor der Werkstatt/Werkshalle (3) oder aber in der Abstellhalle bzw. dem Umfahrgleis 44 nach Umfahrung der zuvor genannten Gebäude (6). Ein Depotmitarbeiter/Rangierer kann das Fahrzeug darauffolgend an der abgestellten Position abholen und es bei Bedarf zum jeweiligen Gebäude zur Durchführung etwaiger Services (Besandung, Waschvorgang, Reparatur) fahren (3, 7). Alternativ kann das Fahrzeug auch in der Abstellhalle verbleiben. Nach abgeschlossener Tätigkeit wird die Straßenbahn aus dem Gebäude hinaus zur Halle gefahren (4) oder gegebenenfalls auf das Umfahrgleis 44 abgestellt (6). Nach Durchführung der gesamten Betriebsbereitmachung ist das Fahrzeug bereit zum Aufrüsten und zur Ausfahrt für den nächsten Umlauf (8).



**Abbildung 1: Abstrahierte Darstellung des Betriebshofes in Potsdam mit Bezug zu den Prozessen der Betriebsbereitmachung**



**Abbildung 2: Überblick über gesamten Prozessablauf der Betriebsbereitmachung auf dem Betriebshof Potsdam (siehe auch Anhang)**

Zwischen der Einfahrt der Straßenbahn auf den Betriebshof durch den Fahrer (inklusive Zielgleiswahl) und der Ausfahrt der Straßenbahn nach abgeschlossener Betriebsbereitmachung haben sich nach der Analyse der Prozesse etwa 30 Entscheidungen ergeben, welche aus 80 Teilprozessen entstehen. Dabei werden beispielsweise der Besandungs- und Waschprozess als separate Teilprozesse angesehen. Beide Prozesse können vom Betriebshofverantwortlichen unabhängig voneinander für die Straßenbahn „gebucht“ werden.

**Tabelle 1: Überblick über Prozessschritte der Betriebsbereitmachung auf dem Betriebshof Potsdam**

ID	Prozessschritt der Betriebsbereitmachung
1	Zielgleiswahl
2	Einfahrt in Betriebshof
3	Tätigkeiten in Werkstatt/Werkshalle
4	Ausfahrt aus Werkstatt/Werkshalle
5	Fahrt zu Fahrzeug-/Abstellhalle
6	Abstellen in Abstellhalle/Umfahrungsgleis 44, inklusive Abrüsten und Aufrüsten
7	Gf. Umfahrung zu Werkstattgebäude
8	Ausfahrt aus Betriebshof

Eine nähere Analyse der 80 Teilprozesse ergab, dass sich besonders der Besandungs- und Waschprozess als Use-Cases mit besonders hohem wirtschaftlichen Potenzial herausgestellt haben (Tabelle 2). Beide Prozesse gelten als zeitaufwändig für den Depotmitarbeiter, wobei der Zeitaufwand der eigentlichen Besandung, des eigentlichen Waschprozesses und die Fahrtwege betrachtet wurden.

Nicht weiter betrachtet wurde die Behandlung der Fahrzeuge für Wartungs- und Reparaturprozesse. Die Prüf- und Schadensszenarien sind bei derzeit drei komplett unterschiedlichen Fahrzeugtypen in einer relativ kleinen Flotte zu differenzieren, um hier Prozesse zu definieren und zu automatisieren. Es erfolgte für dieses Projekt daher eine Beschränkung auf reproduzierbare und wenig komplexe Vorgänge wie das Waschen und Besanden sowie die Rangierprozesse zur und aus der Werkstatt.

Für den Besandungsvorgang wird im Versuchsszenario die benötigte Zeit simuliert. Eine für die gegebenen Verhältnisse geeignete Automatisierungslösung war nicht verfügbar, ist aber grundsätzlich technisch möglich. Dagegen war die vorhandene Waschanlage bereits mit Automatisierungsschnittstellen ausgestattet, sodass hier auch der tatsächliche automatische Ablauf demonstriert werden kann.

**Tabelle 2: Identifikation des umzusetzenden Use-Cases, inklusive Bewertung hinsichtlich der Automatisierbarkeit und des wirtschaftlichen Potentials durch mögliche Arbeitszeiteinsparung des Personals**

ID	Prozessschritt	Bewertung hinsichtlich	
		Automatisierbarkeit	Wirtschaftlichkeit
1, 2	Bahnfahrer fährt Zielgleis auf Betriebshof an	Ja	Vorhanden
7	Fahrt zu Werkshalle	Ja	Hoch
3	Besandung	Teilweise	Hoch
3	Waschvorgang	Ja	Hoch
4	Ausfahrt aus Werkshalle	Ja	Vorhanden
5	Fahrt zu Abstellhalle	Ja	Vorhanden
6	Abstellen, Abrüsten, Aufrüsten	Ja	Hoch
8	Ausfahrt vom Betriebshof	ja	Vorhanden

Im Arbeitspaket 1.2 wurde der Zielzustand eines digitalen Betriebshofs unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Arbeitspaket 1.1 spezifiziert. Dazu wurden für die jeweils als Prozess beschriebenen Use-Cases mögliche Lösungsansätze hinsichtlich der Automatisierung herausgearbeitet. Dies umfasst dabei die Beschreibung der im Prozess enthaltenen Tätigkeiten bzw. Entscheidungen, der beteiligten Rollen sowie eine mögliche Realisierung der erforderlichen Automatisierung. Durch dieses Vorgehen konnten die automatisierbaren Vorgänge schrittweise analysiert und neue Realisierungsmöglichkeiten gefunden werden. So wurde beispielsweise der in AP 1.1 herausgearbeiteten Use-Case des Besandungsprozess der Tram näher analysiert. Wie in Tabelle 1 auszugsweise dargestellt wurden die für diesen Use-Case relevanten Einzelprozesse extrahiert und eine mögliche Automatisierungsmöglichkeit erarbeitet. So muss für einen automatisierten Betrieb der Sandfüllstand der Tram nicht wie bisher durch den Fahrer manuell gemeldet werden, sondern diese Tätigkeit muss automatisiert möglich sein. Dies kann zum Beispiel durch die Ermittlung des Sandfüllstandes mittels entsprechender Sensoren realisiert werden.

**Tabelle 3: Auszug der Analyse des Use-Case „Besandung“**

Prozess	Tätigkeit/ Entscheidung	Mögliche Automatisierungslösung
<b>1.2 Zielgleiswahl</b>	Fahrer meldet Sandfüllstand vor Ankunft	Sandfüllstand wird mittels Sensorik erfasst, und dem BHMS vor Ankunft der Bahn auf dem Betriebshof mitgeteilt.
	Besanden notwendig?	Automatisierte Entscheidung anhand des vom Sensor erfassten Sandfüllstandes innerhalb des BHMS.
...		
<b>3.2a Waschen- Einfahrt</b>	Einfahrt in die Servicehalle	Automatisierte Bewältigung der Fahrbewegung durch die automatisierte Tram.
<b>3.2b Besanden-Waschen</b>	Vorrücken bis zur markierten Position in der Servicehalle	Das Fahrzeug kann mit der vorhandenen Sensorik (z.B. der Kamera) die Markierung bzw. seine Position erkennen und sich relativ dazu positionieren.
	Besandungsvorgang	Das Einfüllen des Sandes muss automatisiert werden. Dies kann beispielsweise durch eine entsprechende Maschine umgesetzt werden, welche die Einfüllung des Sandes automatisiert ausführen kann. Dies kann dann über ein zentrales Kommunikationssystem über das BHMS ansteuerbar sein.
	Besandung erfolgt?	Eine Erhöhung des Sandfüllstandes kann mittels der Sensorik überprüft werden.



Meldung an Depot Manager, dass die Besandung durchgeführt wurde	Die Meldung über die erfolgreiche Besandung kann dem Depot Manager digital über ein zentrales Kommunikationssystem mitgeteilt werden.
...	

Anhand der vorangegangenen Spezifizierung konnten Anforderungen an einen digitalen Betriebshof abgeleitet werden. Diese wurden für alle relevanten Use-Cases auf dem Betriebshof in Potsdam in einem Anforderungskatalog erfasst, in welchem zusätzlich die beteiligten Kommunikationsakteure bzw. -objekte, relevante Aktionen und Beispiele sowie eine Gewichtung der Relevanz (*must, should, can*) analysiert wurden (Meilenstein M1 04/2020). Ein Auszug aus diesem Anforderungskatalog ist nachfolgend mit den für den Use-Case der Besandung relevanten Anforderungen auszugsweise dargestellt. Insgesamt wurden für die Automatisierung des Potsdamer Betriebshofs rund 40 Anforderungen mit der Relevanz *must* ermittelt.

Tabelle 4: Auszug aus dem Anforderungskatalog

1	Kommunikationsakteur/-objekte	... Bezeichnung	Aktionen, Beispiele	1 Kleiner Betriebshof	2 Großer Betriebshof	3 Betriebshof Potsdam	Gewichtung
1.1	alle	Notwendige Kommunikationsschnittstellen müssen zu jedem Zeitpunkt sichergestellt sein		x	x	x	must
1.2	Stellwerk	Das Stellwerk muss die Weichen auf dem Betriebshof fernstellen können		x	x	x	must
	<b>Fahrzeug</b>	...					
2.1		Der Zustandsvektor des Fahrzeugs muss dem BHMS zur Verfügung gestellt werden		x	x	x	must
2.2		Alle Informationen der Selbstdiagnose des Fahrzeugs müssen in den Zustandsvektor eingepflegt werden. Darunter fallen:		x	x	x	must
2.2.a		Sandfüllstand	Der Sandfüllstand wird vor Ankunft der Bahn gemeldet	x	x	x	must

## AP2: Realisierung

### Kurzbeschreibung des Arbeitspaketinhalts

Um Depot-Prozesse mit einem autonom fahrenden Fahrzeug automatisiert ablaufen lassen zu können, mussten folgende Systeme und Funktionen realisiert werden. Entsprechend ist das Arbeitspaket in die Unterarbeitspakete „Realisierung einer digitalen Karte“, „Realisierung eines Data-Hubs“ und „Realisierung eines autonomen Fahrzeugs“ untergliedert, die im nachfolgenden Unterkapitel eingehender beschrieben werden<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Bei der Realisierung der Arbeitspakete zu beachten war, dass auf dem Betriebshof weiterhin der volle Regelbetrieb stattfand, der aufgrund des Aufgabenspektrums der ViP vorrangig war und sich somit alle Aktivitäten in den Arbeitspaketen diesen Aspekten unterordnen mussten. Dies gilt insbesondere für die Funktionalitäten der Leitstelle und Prioritätensetzungen bei Störungen oder außergewöhnlichen Betriebslagen.

1. **Betriebshof-Managementsystem:** Zur zentralen Steuerung aller automatisierten Prozesse wurde parallel zum existierenden, vitalen Betriebshof-Managementsystem ein übergeordnetes Betriebshof-Managementsystem (BMS) implementiert. Über dieses disponiert der sogenannte „AStriD-Dispatcher“ die automatisierten Depot-Prozesse und steuert zur Umsetzung die angebundenen Systeme, also Fahrzeug und stationäre Anlagen, wie z.B. Waschanlage und Hallentore aus. Hierfür wurde in einem Baucontainer eine eigene „AStriD-Leitstelle“ eingerichtet, in der auch der sogenannte „AStriD-Supervisor“ die Sicherheits-Überwachung der autonomen Fahrt durchführt (s. „Sicherer Remote Not-Aus“ unten).
2. **Data-Hub:** Als zentrale Datendrehscheibe zur Erfassung und Verteilung der Daten für das autonome Fahren der Straßenbahn im Depot wurde der Data Hub prototypisch entwickelt. In diesem Zusammenhang wurden auch bisher manuelle Prozesse auf dem Betriebshofs wie Besandungs- und Waschvorgänge (teil-)automatisiert und darüber hinaus die Telemetriedatenerfassung realisiert. Die dabei aufgezeichneten Werte werden in der Cloud gespeichert und visualisiert. Ein Teil der Daten wurde über die mCLOUD bzw. Mobilithek zur Verfügung gestellt. Dieses Arbeitspaket umfasste die Spezifikation aller Anforderungen und Use Cases, die Konzeptionierung und Implementierung des Data Hubs, die Integration aller beteiligten Komponenten auf Fahrzeug- und Landseite sowie die abschließende Erprobung des Gesamtsystems.
3. **Schnittstellen-Handler:** Die vom Betriebshof-Managementsystem über den Data-Hub abgesetzten Befehle zum Auf- und Abrüsten sowie die Fahrbefehle für die Fahr-Missionen werden über neu implementierte Schnittstellen-Handler im Fahrzeug an die relevanten fahrzeugseitigen Systeme übergeben.
4. **Automatisches Auf- und Abrüsten des Fahrzeuges:** Über das BMS kann der AStriD-Dispatcher das Fahrzeug automatisch auf- und abrüsten. Hierbei wird die Bordnetzatterie eingeschaltet und die elektronischen Geräte (z.B. Fahrzeugsteuerung, Fahrerpult, ADAS-System etc.) incl. der implementierten Selbsttests bis zur vollständigen Betriebsbereitschaft des Fahrzeuges hochgefahren. Beim Abrüsten werden die Geräte wieder in den Stand-by-Modus versetzt und anschließend durch Batterie-Aus komplett abgeschaltet.
5. **Autonomes Fahrzeug:** Zum automatisierten Abfahren der vordefinierten Gleisabschnitte im Depot wird ein Fahrautomat (ATO) eingesetzt, der entsprechend auf die Strecke/die Szenarien angelehrt wurde. Damit das Fahrzeug selbstständig – autonom – auf auftretende Hindernisse reagieren kann, wurde ein „Advanced Driver Assistance System – ADAS“, bestehend aus Sensoren und intelligenten Algorithmen, ins Fahrzeug integriert. Das ADAS-System erfasst auch optische die Lichtsignale und reagiert entsprechend auf die Signalzustände. Als besondere Herausforderung für die korrekte Funktion des ATO- und ADAS-Systems hat sich die hochgenaue Lokalisierung in Gebäuden, wie z.B. Abstellhalle, Werkstatt und Waschanlage, herausgestellt, da dort herkömmliche GNSS-Signale nur unzureichend bzw. gar nicht zu empfangen sind, so dass eine autonome Straßenbahn auf dieser Technologiebasis nicht ausreichend lokalisierbar ist. Die hochgenaue Lokalisierbarkeit ist aber unter allen Betriebsbedingungen erforderlich und nur mit dem alternativen Ansatz der sogenannten Selbst-Lokalisierung – also ohne zusätzliche Hilfsmittel von außen, sondern nur unter Nutzung der Fahrzeug-eigenen Sensorik – erreichbar, welche im Rahmen des Projektes neu entwickelt und umgesetzt wurde.
6. **Digitale Karte:** Für die hochgenaue Lokalisierung wurde eine digitale Karte des Betriebshofes erzeugt, welche die oben genannte Selbst-Lokalisierung ermöglicht und die dafür neben den Gleisen auch deren 3D-Umgebung incl. spezifischer Landmarken (Point of Interest – POIs) enthält, um die Lokalisierung auch in Gebäuden zu ermöglichen.
7. **Sicherer Remote Not-Aus:** Da sich kein Fahrer oder Supervisor an Bord des Fahrzeuges befindet, die Kollisionsvermeidung jedoch noch nicht sicherheitstechnisch zertifiziert ist, wurde durch den AStriD-Supervisor aus der AStriD-Leitstelle heraus eine kontinuierliche Überwachung des Fahrweges per Livebilddatenübertragung sichergestellt und die Möglichkeit einer sicheren Notabschaltung über eine dedizierte Funkverbindung realisiert.



### Darstellung der Ergebnisse

#### Betriebshof-Managementsystem

Damit das autonome Fahrzeug durch die Positionen und Stationen des Depots fahren kann und die Service-Prozesse automatisiert ablaufen können, wurde als zentrales Element ein übergeordnetes Betriebshof-Managementsystem benötigt. Mit Hilfe dieses Systems disponiert der AStriD-Dispatcher die anstehenden Depot-Prozesse und steuert zur Umsetzung die angebundenen Systeme, also Fahrzeuge und stationäre Anlagen, aus. Dazu muss es die Positionen aller Straßenbahnen, den Ist-Zustand der Infrastruktur sowie die Stellung von Signalen und Weichen kennen. Diese Informationen werden dem AStriD-Dispatcher über eine grafische Benutzeroberfläche angezeigt und er kann über Bedienfelder die entsprechenden Aktivitäten – Auf- und Abrüsten des Fahrzeuges, Fahr-Missionen an das Fahrzeug absetzen, Waschanlage aktivieren, Hallentore öffnen – starten.

Im Depot der ViP Potsdam wird aktuell ein Betriebshof-Managementsystem der Firma VAB GmbH eingesetzt. Hierüber erhalten die ViP-Leitstellen-Mitarbeiter die Information über Weichenlagen, Signaleinstellungen und Belegung der Gleisabschnitte mit Fahrzeugen, und können mit dieser Kenntnis des aktuellen Zustandes auf dem Betriebshof die erforderlichen Fahrstraßen für Fahrzeugbewegungen auswählen. Die Fahrstraße wird dann mittels elektronischer Weichen automatisch eingestellt.

Für die Disposition und Steuerung des automatisierten AStriD-Betriebes wären Anpassungen und Erweiterungen dieses Systems erforderlich gewesen, um die oben genannten Automatisierungs-Funktionalitäten zu realisieren. Da das VAB-System von vitaler Bedeutung für den operativen Betrieb im Depot ist, wurde für den AStriD-Betrieb ein eigenes AStriD-Betriebshof-Managementsystem eingesetzt, um mögliche negative Beeinflussungen des Betriebsablaufs auszuschließen. Darüber hinaus musste sichergestellt werden, dass die Hoheit über alle Fahrbewegungen und Serviceprozesse weiter in einer Hand und damit bei der Leitstelle der ViP bleibt. Um dennoch die auch für AStriD wesentlichen Informationen zu erhalten, wurde eine Schnittstelle zum VAB-System eingerichtet.

#### *Grafische Benutzeroberfläche*

Das Erscheinungsbild des Gleisbildes sollte sich an den Erfordernissen des realen Betriebs orientieren. Die Erfahrungen aus dem realen Depotbetrieb für nicht-autonome Fahrzeuge flossen hierbei in die Erstellung des Gleisbildes ein.

Für den AStriD-Dispatcher wurden folgende Informationen als relevant erachtet, die entsprechend im Gleisbild leicht erkennbar und deutlich sichtbar dargestellt werden sollen:

- Position der autonomen Tram
- Aktuell eingestellte Mission
- Fahrbereitschaft der autonomen Tram
- Weichenlagen
- Signalstellungen
- Position der weiteren, nicht autonomen, Straßenbahnen im Depot

Die ersten beiden Informationen erhält das BMS direkt von den Systemen der Tram selbst. Die weiteren Informationen erhält das BMS über die Schnittstelle zum VAB-System.

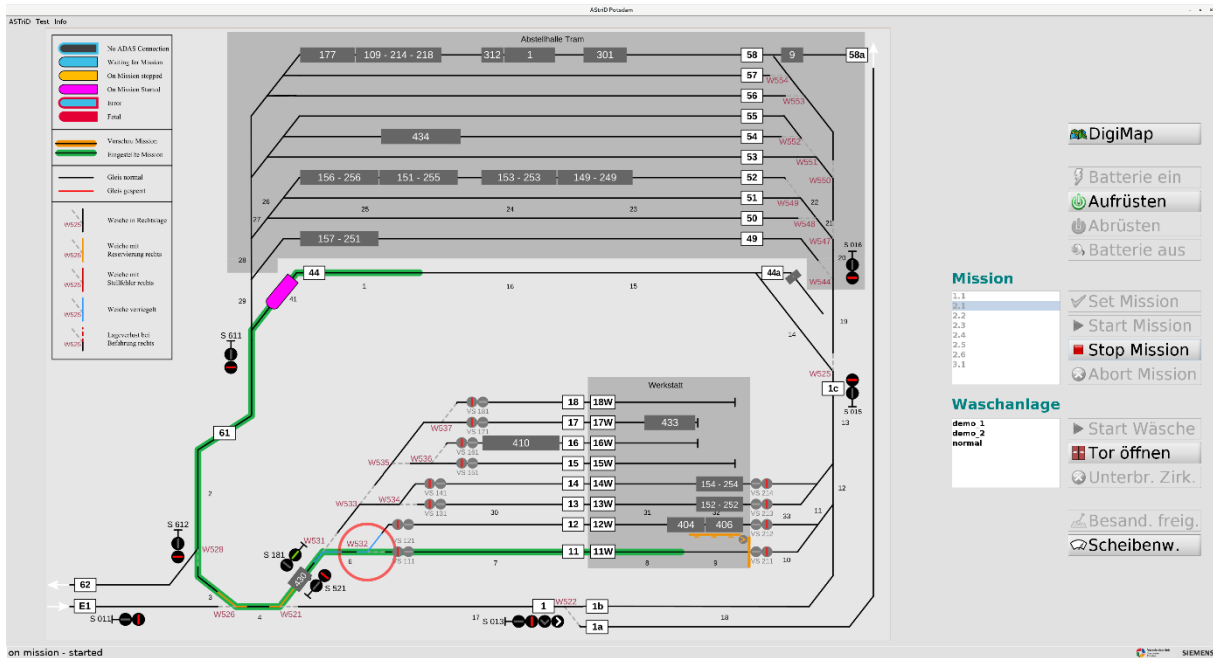


Abbildung 3 – Gleisbild in der Bedienoberfläche des BMS

Der Hauptbereich des Bedienbilds wird durch das schematische Gleisbild eingenommen, das den gesamten Betriebshof mit allen Fahrzeugen, Weichen, Signalen, der Waschanlage und deren zugehörigem Hallentor darstellt.

An der rechten Seite des Fensters befinden sich die Bedienfelder zur Ansteuerung des Fahrzeugs, der Waschanlagen und des Hallentors der Waschhalle.

Zur Unterstützung des AStrID-Dispatchers befindet sich auf der linken Seite des Fensters eine Legende zur Visualisierung der wichtigsten Zustände im Gleisbild.

### Visualisierung

#### Position der autonomen Tram

Für das ADAS-System sind die Fahrstrecken der Missionen in Segmente unterteilt. Diese Information sollte entsprechend im Gleisbild genutzt werden, um den Zug an den jeweiligen Segmentpunkten im Bild entsprechend darzustellen.

Über die ADAS-Schnittstelle werden zwar zu jeder Zeit auch die konkreten Lokalisierungs-Koordinaten an das BMS übertragen. Auf eine Nutzung dieser Daten für die Darstellung des Zugsymbols im Gleisbild wurde von vornherein verzichtet, da eine derart exakte Positionierung nicht nur für die Aufgaben des AStrID-Dispatchers irrelevant ist, sondern auch höhere Anforderungen an die Darstellung im Gleisbild mit sich bringen würde. Der Aufwand hierfür wäre weder für den Testbetrieb noch für einen theoretischen produktiven Einsatz gerechtfertigt gewesen. Auch in bestehenden, im produktiven Betrieb befindliche BMS-Installationen im nicht-automatisierten Depot positionieren Züge auf dem Gleisbild nur an bestimmten vordefinierten Punkten im Bild, da diese Darstellung den Erfordernissen des Betriebs am ehesten entspricht.

Dementsprechend ist auch das gesamte Gleisbild nur schematisch, nicht jedoch maßstabsgetreu, dargestellt. Die Relation der Gleislängen zueinander soll ebenso wie die relative Länge in etwa den realen Gegebenheiten entsprechen, ist jedoch der Gesamtübersicht unterzuordnen. Insbesondere soll das gesamte Gleisbild ohne notwendige Scrollvorgänge jederzeit vollständig sichtbar und für den AStrID-Dispatcher erfassbar dargestellt werden. Daher sind einzelne Gleisabschnitte im Vergleich zur Realität verkürzt dargestellt, Kurven des Gleisbettes nur angedeutet, als auch die Position von Weichen und Signalen nur in ihrer relativen Position zueinander und zu den Gleisen abgebildet.

Durch die Verkürzung einzelner Gleisabschnitte und der teils hohen Dichte an Missionssegmenten insbesondere in den Weichenbereichen der Abstellhalle ergab sich das Problem, dass das entsprechende Zugsymbol nicht in allen Segmenten in voller Größe dargestellt werden kann. Die Darstellung des Zugsymbol wurde

daher so gewählt, dass die gewünschten Informationen auch bei geringerer Symbolgröße schnell erfassbar bleiben. Da die jeweiligen Zustände der autonomen Tram ausschließlich durch Farben visualisiert werden, bleibt der Informationsgehalt auch bei verkleinertem Symbol erhalten.

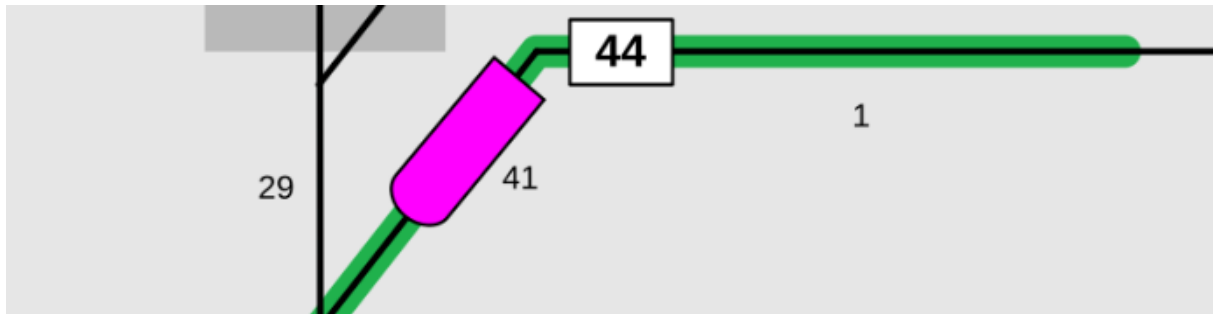


Abbildung 4 – Zugsymbol auf Segment 41

Abbildung 4 zeigt die autonome Tram auf Segment 41 beim Verlassen des Gleises 44. Sichtbar sind ebenso die Segmente 1 und 29. Das Zugsymbol ist hier bereits in der verkleinerten Darstellung zu sehen.

*Aktuell eingestellte Mission*

Es sollte zu jeder Zeit klar ersichtlich sein, ob sich das Fahrzeug gerade in einer Mission befindet, für eine Mission bereit ist oder sich in einem Stöorzustand befindet. Ebenso sollte die aktuell eingestellte Mission klar ersichtlich sein.

Durch die visuelle Darstellung des gesamten Gleislayouts des Depots ergab sich die Möglichkeit die gerade eingestellte Mission direkt an den jeweiligen Gleisen zu markieren und somit eine für den AStriD-Dispatcher viel schneller erfassbare Visualisierung als nur die Missionsbezeichnung zu realisieren. Dies ermöglichte nicht nur die Darstellung der gerade eingestellten Mission, sondern auch die Strecke einer noch auszuwählenden Mission. Befindet sich das Fahrzeug also gerade im Zustand „Warten auf Mission“ sieht der AStriD-Dispatcher bei Auswahl der nächsten Mission bereits vorab die gewählte Fahrstrecke und kann entsprechend schnell erkennen, ob diese tatsächlich seiner gewünschten Route entspricht.

Die Unterscheidung zwischen einer ausgewählten (aber noch nicht eingestellten Mission) und einer im ADAS eingestellten Mission wurde durch die Farbgebung der jeweiligen Missionsstrecke kenntlich gemacht.

	Missionsvorschau
	Eingestellte Mission

Tabelle 5 – Visualisierung der Missionen

*Fahrbereitschaft der Tram*

Die Fahrbereitschaft der Tram wird vorwiegend durch die Statusinformationen des ADAS definiert.

Auf Grund der Erfahrungen aus dem realen Produktivbetrieb des BMS sollte die Farbgebung des Fahrzeugsymbols genutzt werden, um derartige fahrzeugbezogene Informationen anzuzeigen. Die jeweiligen Zustände des Fahrzeugs wurden jeweils durch definierte, klar unterscheidbare Farben visualisiert.

	ADAS-Verbindung inaktiv
	Warten auf Mission
	Mission eingestellt und gestoppt
	Mission eingestellt und gestartet
	Fehlerzustand

	Fataler Fehler
---	----------------

**Tabelle 6 - Visualisierung der Fahrzeugzustände**

Durch Verwendung unterschiedlicher Farben für die Umrandung des Fahrzeugsymbols ließen sich noch mehr Informationen im Zugsymbol darstellen, sollte sich eine derartige Notwendigkeit in der Zukunft ergeben. Die Unterscheidbarkeit ist für diesen Zweck auch bei der verkleinerten Darstellung in Weichenbereichen gegeben.

Theoretisch wäre es möglich weitere Informationen als Text oder Symbol im Fahrzeugsymbol selbst unterzubringen, jedoch wäre diese Darstellung nur auf der vollen Symbolgröße erkennbar, nicht jedoch in der verkleinerten Darstellung. Bei einer derartigen Entscheidung muss auch berücksichtigt werden, dass bei einem produktiven Einsatz des Systems in der Regel mehr als nur ein zum autonomen Fahren ausgerüstetes Fahrzeug im Depot sein wird. Es ist daher anzunehmen, dass daher eher die jeweilige Fahrzeugnummer die wichtigste Information sein wird, die am jeweiligen Symbol dargestellt werden sollte.

*Schnittstelle zum bestehenden Betriebshof-Managementsystem*

Die Schnittstelle wurde unidirektional ausgeführt, d.h. es werden nur Statusinformationen von VAB-System zum AStriD-BMS übertragen. Die Gegenrichtung, Senden von Informationen bzw. Anforderungen vom AStriD-BMS an das VAB-System wurde nicht vorgesehen, um Beeinflussungen des Betriebsablaufs durch den Testbetrieb von vornherein auszuschließen. Auch wenn es wünschenswert gewesen wäre, zumindest die Anforderung von Fahrwegen auf elektronischem Weg direkt an das vitale VAB-System zu übertragen, wären auch dafür Anpassungen unter Berücksichtigung der Sicherheitsbelange erforderlich gewesen werden, die über den Umfang des AStriD-Projekts hinausgegangen wären und zudem in für ViP nicht erwünschter Weise in den Regelbetrieb eingegriffen hätten. Daher wurde die Anforderung der Fahrstraße für den AStriD-Betrieb sehr pragmatisch realisiert, indem der AStriD-Dispatcher telefonisch beim ViP-Leitstellen-Mitarbeiter anfragt, dieser über das vitale System die Fahrstraße stellt und wiederum telefonisch an den AStriD-Dispatcher bestätigt.


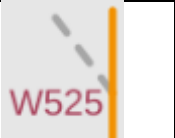
Folgende Elemente werden in der Schnittstelle in einem definierten Dateiformat übertragen:




- Weicheninformationen (Lage, Verriegelung, Reservierung, Stellfehler)
- Signalinformationen (Status, Störung)
- Gleisbelegungen (mit Wagennummern und Position im Gleis)

Nach jeder Änderung der Zustände in den Steuerungsbereichen der Weichensteuerung wird eine neue Datei erzeugt, in der die aktuellen Zustände abgelegt werden. Diese Datei wird per SCP (Secure Copy) in ein zuvor festgelegtes Verzeichnis an den Data Hub versendet. Dieser verteilt den Inhalt der Datei anschließend per MQTT an das AStriD-BMS. Durch die gesammelte Übertragung der Zustände aller Elemente ist sichergestellt, dass auch bei einer zeitweisen Störung der Schnittstelle mit der nächsten erfolgreichen Übertragung wieder alle Elemente im jeweils aktuellen Zustand korrekt angezeigt werden.

*Weichenlagen*


Die jeweilige Lage sämtlicher Weichen wird über die Schnittstelle zum VAB-System an das BMS übertragen. Diese Lage kann, in Verbindung mit der ebenfalls übertragenen Information zu reservierten bzw. verschlossenen Weichen, den AStriD-Dispatcher dabei unterstützen, eine zur Mission abweichende Lage zu erkennen und frühzeitig darauf zu reagieren, etwa indem die Mission gestoppt und die in der ViP-Leitstelle angeforderte Fahrstrecke korrigiert wird.

	Weiche in Rechtslage
	Weiche mit Reservierung rechts

	Weiche mit Stellfehler rechts
	Weiche in Rechtslage verriegelt
	Lageverlust bei Befahrung rechts

**Tabelle 7 – Visualisierung der Weichen**

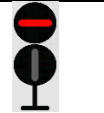

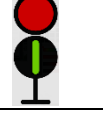
Da es durch die fernmündliche Kommunikation mit der Leitstelle der ViP beim Anfordern von Fahrstraßen durchaus zu Missverständnissen kommen kann und da auf Grund des Erprobungsbetriebs im Falle von Störungen der automatischen Tram der Betrieb durch Bevorzugung anderer Fahrten aufrecht erhalten werden muss, kam es bisweilen vor, dass eine Weiche nicht in der für die eingestellte Mission erforderlichen Lage eingestellt wurde. Um derartige Weichenfehlstellungen frühzeitig erkennen zu können und die Tram noch vor Erreichen der Weiche zum Stillstand bringen zu können, wurde eine gesonderte Darstellung für derartig falsch gestellte Weichen umgesetzt. Ist eine im Fahrweg befindliche Weiche in einer nicht zur Mission passenden Lage verriegelt, wird sie mit einem roten Kreis umrahmt, um sie deutlich hervorzuheben.

	Weiche in von Mission abweichender Lage festgestellt.
---	---

**Tabelle 8 – Visualisierung einer von Mission abweichender Weiche**

*Signalstellungen*

Die Stellung der Signale wird ebenso über die Schnittstelle zum VAB-System an das BMS übertragen. Auch diese Signalstellungen sollten im Gleisbild sichtbar gemacht werden, da sie für den AStriD-Dispatcher hilfreich sind zu erkennen, ob der Fahrweg von der ViP-Leitstelle bereits eingestellt wurde. Ebenso lässt sich so leicht erkennen, wenn das Fahrzeug die Signalstellung nicht korrekt erkennt und trotz angezeigtem Fahrtbegriffs die Fahrt nicht aufnimmt. Diese Unterstützung war insbesondere im Testbetrieb dieses Forschungsprojekts hilfreich, um derartige Fehl-Erkennungen schnell sichtbar zu machen. Sie ist jedoch auch für einen etwaigen Produktivbetrieb notwendig, da die ständige Übertragung des Kamerabilds nur für den Erprobungsbetrieb, jedoch nicht für den Produktivbetrieb ökonomisch wäre und damit die Erkennung des Fahrt-zeigenden Signals über das Kamerabild nicht möglich wäre.

	Signalstellung F0
	Signalstellung F1
	Signalstellung F1 mit defekter Lampe für Stellung F0

**Tabelle 9 – Visualisierung der Signale**

*Position der weiteren, nicht autonomen, Straßenbahnen im Depot*

Über die Schnittstelle zum VAB-System werden außerdem alle weiteren im Depot befindlichen Straßenbahnen und deren Position übertragen. Da der Probebetrieb während des regulären Betriebs auf dem Betriebshof durchgeführt wurde, war damit zu rechnen, dass es zu Konflikten zwischen betrieblichen Fahrten der ViP und Testfahrten für das AStriD-Projekt kommen würde. Somit war die Information über die Position aller Fahrzeuge im Depot für die Planung der AStriD-Fahraufträge wichtig, da belegte Gleise bereits vor Anforderung der Fahrt erkannt werden und es somit vermieden werden kann, eine Testfahrt zu starten, wenn bereits sicher ist, dass diese auf Grund eines anderen Fahrzeugs im Fahrweg nicht vollständig durchgeführt werden kann. Auch in einem zukünftigen Produktivbetrieb ist die Position aller Fahrzeuge im Depot wichtig, um Fahrten durch das Depot entsprechend disponieren zu können.

Die Genauigkeit der Positionierung der restlichen Fahrzeuge im Betriebshof ist deutlich geringer als die Genauigkeit der Positionierung des für den autonomen Fahrbetrieb ausgerüsteten Fahrzeugs. Da aber bereits die reine Information über die Belegung eines Gleises ausreicht, wurde die fehlende Genauigkeit der Positionierung im Gleis als für den Testbetrieb nicht relevant betrachtet.

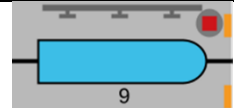

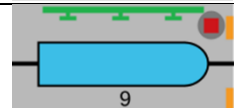
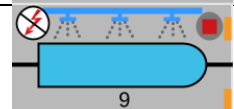
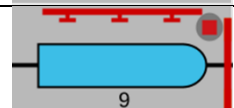
12W	404	406	Die Fahrzeuge 404 und 406 auf Gleis 12W
-----	-----	-----	---

**Tabelle 10 – Visualisierung nicht-autonomer Fahrzeuge**

*Waschanlage / Hallentor*

Zur Ansteuerung der Waschanlage und der Hallentore sind diese Systeme ebenfalls an das AStriD-BMS abgeschlossen. Waschanlage und Hallentore übertragen ihren jeweiligen Status an das BMS, das diesen entsprechend visualisiert. Die Waschanlagensteuerung ist hierbei per S7-Schnittstelle an einen Client angeschlossen, der den entsprechenden Status an das BMS verteilt.

Der Status der Waschanlage wird im BMS zusätzlich zur Visualisierung ausgewertet, um bestimmte Bedienhandlungen standardmäßig zu blockieren. Beispielsweise soll bei aktiver Waschanlage das dort befindliche Fahrzeug nicht gestartet werden können. Das würde zwar nicht zu einem Fehlverhalten führen, da das Fahrzeug zu diesem Zeitpunkt stromlos ist, jedoch soll die Bedienoberfläche des BMS den Bediener bei seiner Arbeit unterstützen und daher nur die Bedienhandlungen erlauben, die im jeweiligen Kontext und Zustand auch sinnvoll sind.

	Grundzustand (hier bei offenem Tor)	Inaktive Waschanlage grau
	Fehler	Inaktive Waschanlage rot
	Start erlaubt	Inaktive Waschanlage grün
	Aktiv, Oberleitung abgeschaltet	Aktive Waschanlage grün
	Verbindungsstörung	Inaktive Waschanlage rot und geschlossenes Tor rot

**Tabelle 11 – Visualisierung der Waschanlage**

	Offen	Offenes Tor orange
---	-------	--------------------



	Geschlossen	Geschlossenes Tor orange
	Unbekannte Lage	Wechsel zwischen Darstellung „offen“ und „geschlossen“
	Verbindungsstörung	Inaktive Waschanlage rot und geschlossenes Tor rot

Tabelle 12 – Visualisierung des Hallentors

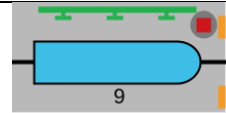

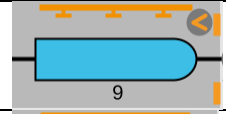
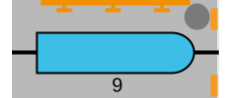
	Fahrzeug in korrekter Waschposition
	Vorfahren
	Zurückfahren
	Ampel inaktiv

Tabelle 13 – Visualisierung der Ampel

*Wasch- und Besandungsbedarf*

Der simulierte Wasch-, bzw. Besandungsbedarf wird in der Bedienoberfläche des BMS als aufleuchtende Symbole dargestellt. Die Symbole werden direkt im Gleisbild dargestellt. Eine direkte Anzeige auf dem jeweiligen Zugsymbol ist je nach Monitorgröße des Arbeitsplatzes des AStriD-Dispatchers unter Umständen zu schlecht zu erkennen. Daher wurde die Darstellung im Gleisbild gewählt, welche bei Unterstützung nur einer autonomen Tram, wie hier im Erprobungsbetrieb, ausreichend ist. Für einen produktiven Einsatz könnte eine Visualisierung im Zugsymbol noch einmal konkreter untersucht werden. Auch die Beibehaltung der jetzigen Darstellung im Gleisbild mit Anzeige der jeweiligen Fahrzeuge durch eine gesonderte Bedienhandlung ist denkbar.

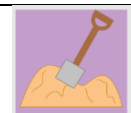

	Besandungsbedarf
	Waschbedarf

Tabelle 14 – Visualisierung von Wasch- und Besandungsbedarf





**Steuerung**

Für die Steuerungsfunktionen der BMS liegt der Grundgedanke des BMS zu Grunde den AStriD-Dispatcher so weit wie möglich zu unterstützen. Daher bietet die Bedienoberfläche immer nur die Funktionalitäten an, die im jeweiligen Zustand sinnvoll sind. So kann bspw. keine Mission gesetzt werden, wenn sich das Fahrzeug bereits in einer aktiven Mission befindet. Die Ausführung dieser Aktion wäre zwar unkritisch, da das ADAS-System einen solchen Befehl ignorieren würde, jedoch soll der Anwender in der Bedienung geführt werden. Durch das Deaktivieren von Bedienfeldern werden nicht nur Fehlbedienungen verhindert, sondern sie erleichtern auch die Orientierung, da sie eine zusätzlich visuelle Hilfe beim Erkennen von Zuständen und Zustandsänderungen bieten.

Insbesondere für den Erprobungsbetrieb besteht jedoch die Option, alle Bedienfelder freizuschalten, um Fehlerzustände eventuell beheben zu können ohne aktiv in andere Subsysteme (z.B. ADAS) eingreifen zu müssen). Eine solche Funktionalität kann jedoch auch für einen Produktivbetrieb sinnvoll sein, da hier dem AStriD-Dispatcher in seiner regulären Aufgabe die Möglichkeit gegeben wird, durch gezieltes Absetzen von Steuerbefehlen unkritische Fehlerzustände beheben zu können, ohne auf Wartungspersonal angewiesen zu sein.





*Fahrzeugsteuerung*

Über die Bedienfelder der Fahrzeugsteuerung können die entsprechenden Befehle an das Duagon-Modul übertragen werden.

 <b>Batterie ein</b>	Batterie einschalten
 <b>Aufrüsten</b>	Fahrerstand aufrüsten
 <b>Abrüsten</b>	Fahrerstand abrüsten
 <b>Batterie aus</b>	Batterie ausschalten




*Missionssteuerung*

Die Bedienflächen zur Missionssteuerung senden die entsprechenden Befehle an das ADAS-Modul. Für die Bedienhandlung „Mission starten“ wird zeitgleich der entsprechende Befehl an das Duagon-Modul gesendet.


<p><b>Mission</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>3.1</li> </ul>	<p>Vor dem Setzen einer Mission muss aus der entsprechenden Liste die gewünschte Mission ausgewählt werden. Die Auswahl der Mission löst die entsprechende Vorschau im Gleisbild aus.</p>
 <b>Set Mission</b>	Ausgewählte Mission setzen
 <b>Start Mission</b>	Gesetzte Mission starten
 <b>Stop Mission</b>	Stoppen der gestarteten Mission
 <b>Abort Mission</b>	Abbrechen der gesetzten Mission

*Waschanlagen- und Torsteuerung*


Die Bedienoberflächen zur Waschanlagen- und Torsteuerung senden die entsprechenden Befehle per MQTT an die entsprechende S7-Steuerung.

<p><b>Waschanlage</b></p> <p>demo_1 demo_2 normal</p>	<p>Zum Start einer Wäsche muss das entsprechende Programm ausgewählt werden. Für den Erprobungsbetrieb der autonomen Tram wurden extra gesonderte Waschprogramme in der Waschanlage hinterlegt, die für Tests und Demonstrationszwecke ausreichend sind, jedoch Zeit und Ressourcen sparen indem bspw. nur das Waschportal bewegt, jedoch kein Wasser eingesetzt wird.</p>
<p> <b>Start Wäsche</b></p>	<p>Start des gewählten Waschprogramm</p>
<p> <b>Tor öffnen</b></p>	<p>Öffnen des Hallentors</p>
<p> <b>Unterbr. Zirk.</b></p>	<p>Um Lokalisierungsprobleme durch in der Waschhalle befindlichen Sprühnebel verhindern zu können, wurde ein Bedienfeld zum Unterbrechen der regelmäßigen automatischen Zirkulation der Waschanlage auslösen zu können. Auf Grund der potentiell negativen Auswirkungen der Abschaltung dieser Zirkulation wurde auf deren Einsatz jedoch verzichtet und das entsprechende Bedienfeld dauerhaft deaktiviert.</p>

*Sandanlagensteuerung*


<p> <b>Besand. freig.</b></p>	<p>Freigabe des Fahrzeugs zur Besandung. Hiermit sendet der AStriD-Dispatcher einen Befehl an die Simulation der Besandungsanlage, dass das Fahrzeug für die Besandung freigegeben ist. Die Bedienflächen zur Fahrzeug- und Missionssteuerung werden in diesem Falle deaktiviert, bis die Freigabe wieder zurück genommen wird.</p>
--	---

*Scheibenwischer*

<p> <b>Scheibenw.</b></p>	<p>Ein- bzw. Ausschalten des Scheibenwischers der automatischen Tram. Um bei Regen die Funktion der Kameras erhalten zu können, kann vom AStriD-Dispatcher der Scheibenwischer eingeschaltet werden.</p>
--	--

Scheibenwischer ein- und ausschalten

*Digitale Karte*

<p> <b>DigiMap</b></p>	<p>Aktualisierung der digitalen Karte</p>
---	---

Durch Bedienung der entsprechenden Bedienfläche wird die Liste der verfügbaren digitalen Karte abgerufen. Die aktuell installierte digitale Karte wird markiert, so dass klar ersichtlich ist, ob eine neuere Kartenversion zur Verfügung steht.

Das BMS erlaubt dann die Installation einer bestimmten Version der digitalen Karte auf dem Fahrzeug auszulösen. Der Installationsfortschritt wird dem AStriD-Dispatcher entsprechend angezeigt.

*Funktionale Ausrichtung auf Erprobungsbetrieb*

Trotz der für die Bedienung des BMS zu Grunde liegenden Konzepte, die den Erfahrungen des Einsatzes im realen Produktivbetrieb entnommen wurden, wurden einige Entscheidungen getroffen, die das BMS besonders für den Einsatz im Probetrieb des Forschungsprojekts zuschneiden.

**Bedienoberfläche**

Da für das Forschungsprojekt nur ein einzelnes Fahrzeug für den autonomen Betrieb ausgerüstet wurde, ergab sich keine Notwendigkeit der Unterstützung mehrerer autonomer Fahrzeuge. Das gesamte Bedienkonzept ist daher darauf ausgelegt, dass nur dieses eine Fahrzeug im Depot existiert. Jegliche Befehle an die

Duagon- bzw. ADAS-Schnittstelle werden daher immer an genau dieses Fahrzeug geschickt. Ebenso müssen Statusinformationen immer nur für diese eine Fahrzeug dargestellt werden.

In einem zukünftige Produktivbetrieb müsste jedoch der Einsatz mehrerer autonomer Fahrzeuge unterstützt werden. Das wäre jedoch durch geringe Anpassungen der Bedienoberfläche umsetzbar. Die Darstellung mehrerer Fahrzeuge könnte dadurch für den AStriD-Dispatcher praktikabel gestaltet werden, dass die jeweilige Fahrzeugnummer auf dem entsprechenden Fahrzeugsymbol im Gleisbild mit angezeigt würde. Im Testbetrieb wurde darauf verzichtet, da diese Information bei nur einem Fahrzeug ohne Mehrwert wäre.

Auch die, momentan auf die Steuerung nur eines Fahrzeugs ausgelegte Bedienung, könnte entsprechend erweitert werden, dass für das Absetzen von Befehlen an die Fahrzeuge immer zuvor das entsprechende Fahrzeug ausgewählt werden müsste. Durch entsprechende Hervorhebungen im Gleisbild könnte der Bediener entsprechend unterstützt werden, zu erkennen für welches Fahrzeug ein Befehl abgesetzt werden würde.

Ebenso wäre es denkbar, die Bedienflächen nicht, wie hier für den Testbetrieb umgesetzt, als vom Gleisbild losgelöste Buttonleiste umzusetzen, sondern die jeweiligen Aktionen immer direkt am Zugsymbol durchzuführen. Durch diese enge Kopplung der Aktionen an die jeweiligen Fahrzeugsymbole im Gleisbild können Fehlbedienungen, also das Absetzen von Befehlen an das falsche Fahrzeug, vermieden werden.

### Schnittstellen zum Fahrzeug

Durch die ausschließliche Unterstützung eines einzelnen Fahrzeugs im Testbetrieb wurden die Schnittstellen auch auf genau diesen Anwendungsfall zugeschnitten. Da für einen kommerziellen Einsatz die gleichzeitige Anbindung mehrerer Fahrzeuge notwendig ist, müssten die Schnittstellen dafür entsprechend angepasst werden.

### Data-Hub

In der Gesamtspezifikation erfolgt die Anforderungsspezifikation des Gesamtsystems mittels Use-Cases, aus welchen zudem die Anforderungen an die Teilsysteme abgeleitet wurden. Das Verhalten der Teilsysteme (z.B. Data Hub inklusive Fahrzeugdatenerfassung, BMSBMSBMS, ADAS usw.) und ihre Kommunikation untereinander wird in den Teilsystemspezifikationen unter anderem anhand von Sequenzdiagrammen detaillierter beschrieben. In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind exemplarisch zwei Sequenzdiagramme für den Ablauf des Aufrüstens und eines Waschvorgangs dargestellt.

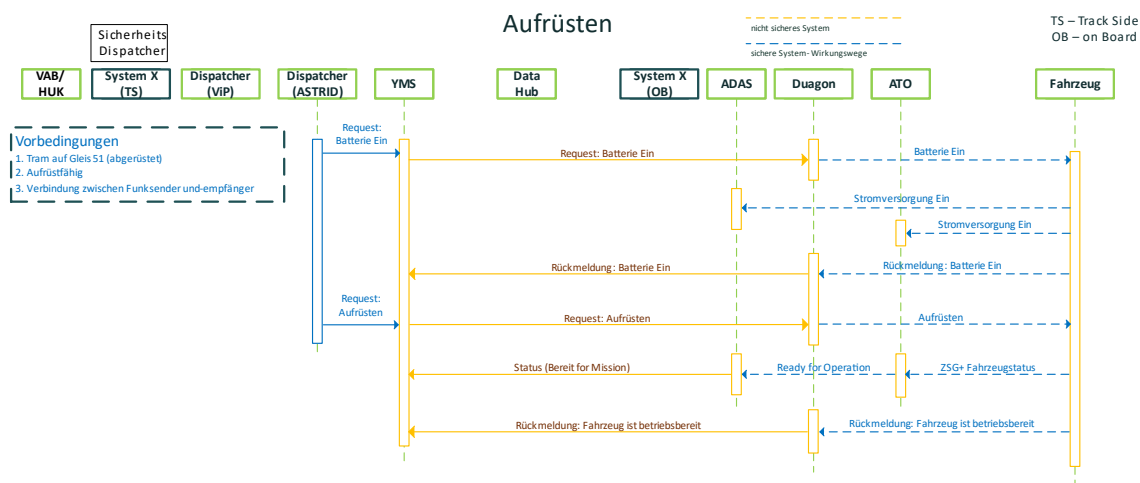


Abbildung 5: Sequenzdiagramm „Aufrüsten“

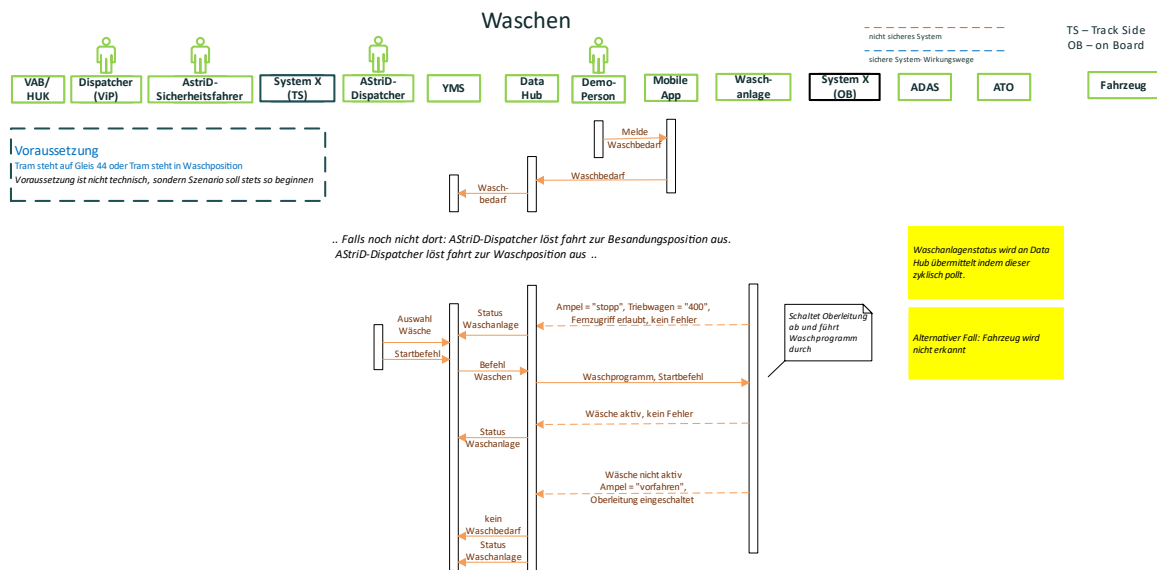


Abbildung 6: Sequenzdiagramm „Waschvorgang“

In der Data Hub Teilsystemspezifikation werden außerdem gängige Cloudanbieter bezüglich ihres Funktionsumfangs, ihrer Verfügbarkeit, Skalierbarkeit, Kosten sowie einfacher Verwendbarkeit und Konfiguration verglichen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse und zuvor definierten Anforderungen werden jeweils Clouddatendienste für den VPN-Server, die Datenerfassung und -haltung von Telemetriedaten in der Cloud sowie der Konfiguration der fahrzeugseitigen Erfassung ausgewählt.

Die erarbeitete Lösungsarchitektur des Data Hubs umfasst eine Infrastruktur für die Kommunikation der beteiligten Teilsysteme über das Mobilfunknetz und ein VPN sowie eine Gateway-Funktionalität und Schnittstellen zur Anbindung dieser Systeme an das Yard Management System. Darüber hinaus stellt der Data Hub zusätzliche Komponenten bereit:

- Mobile App zum Einbinden bisher manueller Prozesse in den digitalen Betriebshof (Besanden und Waschen)
- System zur Erhebung von Fahrzeugtelemetriedaten (teleshark)
- Dashboards zur Visualisierung der Fahrzeugtelemetriedaten

Über den Data Hub wird die Kommunikation zwischen folgenden Teilsysteme ermöglicht: Yard Management System (BMSBMSBMS/BMS), Betriebshofmanagementsystem der ViP (VAB-System), Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), Waschanlage, Mobile App, Deployment der digitalen Karte und Fahrzeugtelemetriedatenerfassung. Die Datenflüsse zwischen den genannten Teilsystemen sind in den jeweiligen Spezifikationen beschrieben.

Das Konzept zur Umsetzung der in den Spezifikationen beschriebenen Lösungsarchitektur umfasst die genutzten Protokolle und Technologien (MQTT, SFTP, S7, HTTP), Konfigurationen (z.B. VPNs, SFTP-Server, Clouddienste), die Evaluation der Mobilfunkabdeckung unterschiedlicher Anbieter auf dem Betriebshof und den Netzwerkplan. Die Realisierung der Basisfunktionalität enthält das VPN, die LTE-Anbindung, die Integration des ViP Betriebshofmanagementsystems und grundlegende Funktionen der Komponenten mobile App, teleshark und Dashboard (M2.2.1 „Data Hub Mock“). Die vollständige Funktionalität des Data Hubs umfasst ferner die Erweiterungen der genannten Komponenten und zusätzliche Schnittstellen zur Anbindung der Waschanlage, Deployment der digitalen Karte auf das Fahrzeug und Anbindung der mCLOUD (M2.2.2 „Data Hub inkl. Schnittstellen“). Eine Gesamtsystemübersicht ist in Abbildung 7 dargestellt.

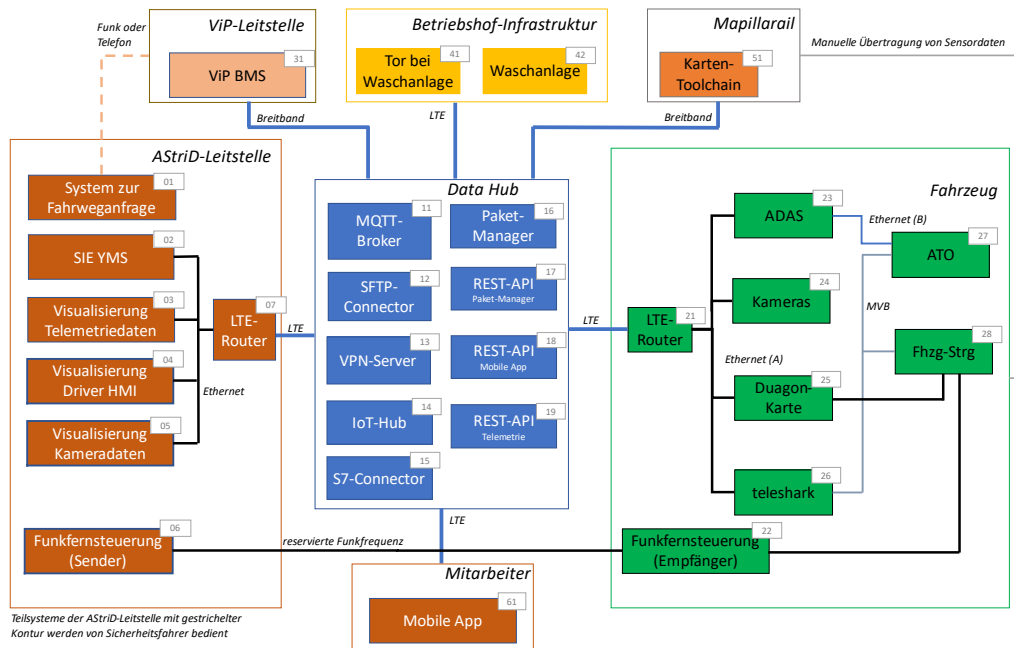


Abbildung 7: Gesamtsystemübersicht

Dieses Arbeitspaket war zu Projektbeginn herausfordernd, da es galt die notwendige Funktionalität des Data Hub zu definieren und dabei die Systeme mit bereits vorhandenen Schnittstellen, die am automatischen Fahren beteiligt sind, in den Data Hub zu integrieren. Die ausgearbeiteten Use Cases dienen als Leitfaden für die Realisierung und trugen zu einem gemeinsamen Verständnis der technischen Projektpartner bei. Durch die gute und schnelle Kommunikation zwischen den Partnern konnten Fragestellungen und auftretende Probleme zügig geklärt und gelöst werden. Die Stabilität des Systems war zu Beginn optimierungsbedürftig, aber durch intensive Tests konnte sie nach und nach verbessert werden (M2.2.3 „Abschluss Erprobung“). Es konnten somit alle Meilensteine des Arbeitspakets bis zum Projektabschluss erreicht werden.

### Schnittstellen-Handler im Fahrzeug

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, versorgt das AStriD-Betriebshof-Managementsystem das Fahrzeug unter anderem mit den Fahraufträgen. Eine weitere Funktion ist das Triggern des automatischen Auf- und Abrüstbefehls, sowie des Startbefehls zur autonomen Fahrt im Depot.

Der LTE-Router stellt die direkte Schnittstelle zwischen AStriD-Leitstelle, Data Hub und dem Fahrzeug dar (s. Abbildung 7). An den LTE-Router sind über zusätzliche Schnittstellen-Handler folgende fahrzeugseitige Systeme zur Realisierung des autonomen Fahrens angeschlossen:

- ADAS-System – über dort neu implementiertes Software-Modul „AST Hypervisor“
- Kameras für die Livebilddatenübertragung an die AStriD-Leitstelle – über Switch
- Fahrzeugsteuerung – über Duagon-Modul

Über die Ethernetverbindung zum LTE-Router kann das Duagon Modul die Befehle vom BMS empfangen. Diese Befehle werden als diskrete Hardwaresignale an die Fahrzeugsteuerung weitergeleitet und dort verarbeitet. So ist es möglich, über das Duagon-Modul verschiedene Signale zwischen Fahrzeug und Landseite auszutauschen. Hierbei handelt es sich um die folgenden Befehle an das Fahrzeug:

- Batterie ein
- Fahrerstand aufrüsten
- Start ATO-Betrieb
- Fahrerstand abrüsten
- Batterie aus
- Scheibenwischer ein



Nach Aussenden des jeweiligen Befehls vom BMS an das Duagon Modul erhält das BMS automatisch eine Rückmeldung über Erhalt des Befehls. Außerdem sendet das Duagon Modul aktiv eine Rückmeldung, sobald die Funktion des jeweiligen Befehls erfolgreich auf dem Fahrzeug ausgeführt wurde. Somit kann sichergestellt werden, dass kein Signal verloren geht und die Reihenfolge der Befehle eingehalten wird.

Die Schnittstellen-Handler und deren vollständige Integration in das Gesamtsystem (Meilenstein "Bereitstellung Integrations-Release R2 – Schnittstellen-Handler für Data-Hub") wurden frühzeitig bereits für die Demonstration des Basis-Release 1 am 23. August 2021 im Rahmen des Pressetermins „Siemens Mobility und Kooperationspartner ViP präsentieren Forschungsprojekt Autonome Straßenbahn im Depot“ realisiert.

### Automatisches Auf-/ Abrüsten der Tram

Neben den Fahraufträgen versorgt das BMS das Fahrzeug auch mit dem Trigger für das automatische Auf- und Abrüsten. Die vom BMS gesendeten Signale werden auf dem Fahrzeug über das Duagon-Modul an das Zentrale Steuergerät (ZSG) der Fahrzeugsteuerung weitergeleitet.

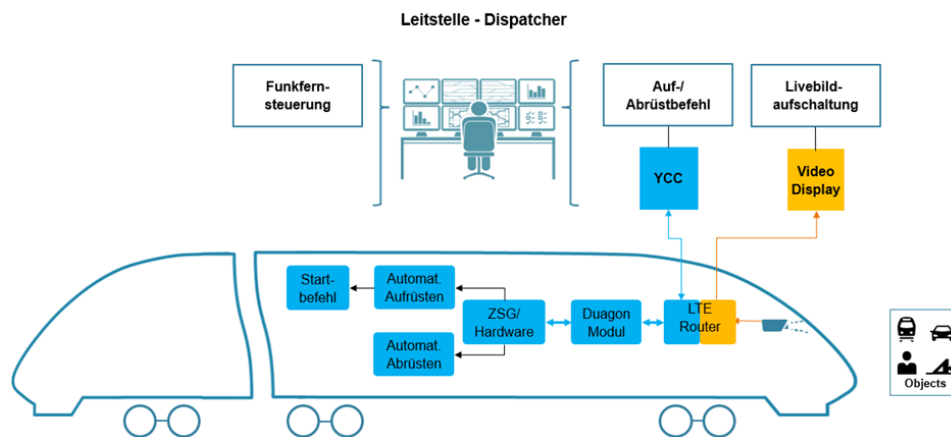


Abbildung 8: Systemarchitektur des automatischen Auf- und Abrüstvorgangs

Im Folgenden wird der Signalaustausch zwischen Fahrzeug und BMS dargestellt und die jeweiligen fahrzeugseitigen Prozesse beschrieben.

### Automatischer Aufrüstvorgang

Für den automatischen Aufrüstvorgang müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein:

- Das Fahrzeug ist abgerüstet
- Der LTE-Router und das Duagon Modul werden über die Batterie versorgt und
- es besteht eine Verbindung zwischen LTE-Router und BMS

Befindet sich das Fahrzeug bereits im aufrüsteten Zustand und erhält den Befehl „Batterie Ein“ oder „Fahrzeug aufrüsten“, ändert dies nichts an dem Fahrzeugzustand. Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, kann der folgende Signalaustausch zwischen BMS und Fahrzeug stattfinden:

1. Das BMS sendet den Befehl "Batterie Ein" an das Fahrzeug

Das ZSG empfängt diesen Befehl und das Batteriehaupschütz wird aktiviert. Alle Komponenten auf dem Fahrzeug werden mit Spannung versorgt und können automatisch hochfahren werden.

Nach diesem Vorgang erfolgt eine Signalantwort:

2. Fahrzeug sendet die Rückmeldung „Fahrzeug Meldet Batterie ein“ an das BMS

Nach Erhalt dieser Rückmeldung kann das nächste Signal gesendet werden:

3. BMS sendet den Befehl "Fahrerstand aufrüsten" an das Fahrzeug

Mit Erhalt dieses Befehls werden alle notwendigen Schritte, wie das Aktivieren der Fahrzeug-Steuergeräte, des ADAS-Systems und der ATO, sowie das Setzen der Fahrtrichtung auf „Vorwärts“ realisiert. Der Prozess wird mit folgender Signalantwort bestätigt:

4. Fahrzeug sendet die Rückmeldung „Fahrzeug meldet bereit für Betrieb“ an das BMS

Damit ist der Aufrüstvorgang des Fahrzeuges abgeschlossen.

### *Automatischer Abrüstvorgang*

Für den automatischen Abrüstvorgang müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein:

- Das Fahrzeug ist aufgerüstet
- Das Fahrzeug befindet sich im Stillstand
- Das Fahrzeug befindet sich nicht mehr im ATO-Modus
- Es besteht eine Verbindung zwischen LTE-Router und BMS

Befindet sich das Fahrzeug bereits im abgerüsteten Zustand und erhält den Befehl „Batterie Aus“ oder „Fahrzeug abrüsten“ ändert dies nichts an dem Fahrzeugzustand. Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, kann der folgende Signalaustausch zwischen BMS und Fahrzeug stattfinden:

1. Das Fahrzeug sendet die Rückmeldung „Fahrzeug Meldet Stillstand“ an das BMS

Das ZSG empfängt diesen Befehl und rüstet das Fahrzeug ab

2. BMS sendet den Befehl „Fahrerstand abrüsten“

Mit Erhalt dieses Befehls werden alle notwendigen Schritte, wie das Setzen der Fahrtrichtung auf „0“, das Deaktivieren des Fahrerpults und die Versetzung der Steuergeräte in Stand-by realisiert. Der Prozess wird mit folgender Signalantwort bestätigt:

3. Fahrzeug sendet die Rückmeldung „Fahrzeug hat Abrüstbefehl erhalten“ an das BMS

Nach Erhalt dieser Rückmeldung kann das nächste Signal gesendet werden:

4. BMS sendet den Befehl „Batterie Aus“ an das Fahrzeug

Nach Erhalt dieses Signal wird nach einer Nachlaufzeit von rund 30 Sekunden, die zum vollständigen Herunterfahren der Drittsysteme benötigt werden, das Batterie Hauptschutz abgeschaltet. Damit ist der Abrüstvorgang abgeschlossen.

### **Autonomes Fahrzeug**

Die Ausgangslage zur Umsetzung der technischen Realisierung des autonomen Fahrzeuges bildete der Demonstrator "Autonome Siemens Tram (AST)" aus dem Jahre 2018. Im Rahmen des AST-Projektes stellte die ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH eine Combino-Straßenbahn zur Verfügung, die von Siemens Mobility für die Erprobung einer autonomen Straßenbahn mit GPS, Rechnern und einer Vielzahl von Sensoren wie Kameras, Lidar- und Radar-Scannern bestückt wurde. Das gemeinsame Entwicklungsprojekt diente dazu, die technologischen Herausforderungen des autonomen Fahrens unter realen Einsatzbedingungen zu erfassen, um Lösungsansätze zu entwickeln und zu testen. Die hieraus bereits vorhandene Hardware und die dort implementierten Software-Funktionsbausteine wurden auf ihre Eignung für den Einsatz im AStriD-Projekt überprüft und erforderliche Anpassungen bzw. neu zu erstellende Funktionen definiert. Das Ergebnis ist ein Konzept zur Realisierung der Fahrscenarien und daraus abgeleitet die Spezifikation der erforderlichen Anpassungen und Entwicklungsbedarfe (Meilenstein „Konzepte und Spezifikationen fertig“), hier kurz zusammengefasst:

#### *Hardware-Setup:*

Das auf der Tram befindliche Sensor- und Rechner-Setup konnte im Wesentlichen für die Zwecke der prototypischen Demonstration verwendet werden. Jedoch kommt nunmehr ein zusätzlicher, neu beschaffter Lidar für die Lokalisierung in Gebäuden zum Einsatz, und eine Optimierung des Gesamt-Setups im Hinblick auf eine spätere hochzuverlässige, sicherheitsrelevante Lösung ist zu untersuchen.

- **Funktions-Modul Fahrautomat:** Fahr-/ Bremskurven für Depotbetrieb und sicheres Umschalten zwischen den verschiedenen Fahraufträgen für die definierten Szenarien neu zu entwickeln
- **Funktions-Modul Hinderniserkennung:** bestehende Funktion an die im Depot befahrenen Streckenabschnitte sowie die dort auftretenden Szenarien und Hindernisse (z.B. Hallentore) anzupassen

- **Funktions-Modul Lichtsignalerkennung:** bestehende Funktion an die im Depot befindlichen Anlagen anzupassen
- **Funktions-Modul Selbst-Lokalisierung:** Lokalisierung in geschlossenen Gebäuden (ohne GPS-Empfang) neu zu entwickeln
- **Funktions-Modul Kartenbereitstellung:** neu zu entwickeln
- **Funktions-Modul Nutzung des zusätzlichen “Point of Interest”-Karten-Layers:** neu zu entwickeln
- **Funktions-Modul Datenaufzeichnung:** Verwendung der bestehenden Lösung
- **Optimierung Sensorset:** Untersuchung der Optimierungs-Möglichkeiten im Hinblick auf die fortschreitenden Technologie-Entwicklungen. Im Folgenden wird auf die Umsetzung der oben genannten Funktionsbausteine und deren Anpassungen/Entwicklungen im Einzelnen eingegangen.

Die initiale Version der Realisierung – Release R1 mit Nutzung der Basis-Karte – wurde für die erste offizielle Demonstration der ausgewählten Depot-Szenarien (Aufrüsten – Bereitstellen – Besandung – Waschanlage – Abstellen – Abrüsten) bereitgestellt. Diese fand am 23. August 2021 im Rahmen des Pressetermins „Siemens Mobility und Kooperationspartner ViP präsentieren Forschungsprojekt Autonome Straßenbahn im Depot“ statt, als Ersatz für die aufgrund von Corona entfallene InnoTrans 2020 (Meilenstein “Bereitstellung R1”). Bereits enthalten war zu diesem Zeitpunkt auch schon ein Teil des Release R2 in Form der vollständigen Integration des Data-Hub und der entsprechenden Schnittstellen-Handler im Fahrzeug (Meilenstein “Bereitstellung Integrations-Release R2 – Schnittstellen-Handler für Data-Hub”).

### *Fahrautomat*

Als Komponente zum automatisierten Abfahren von vordefinierten Strecken kam bereits im AST-Projekt ein Fahrautomat, die "Automatic Train Operation – ATO“ zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein bewährtes Konzept aus der Bahnwelt zur Steuerung von automatischen Zügen. Dieses besteht aus der namensgebenden Zugsteuerung und einem direkt damit verknüpftem Zugsicherungssystem. Bei dem von AST verwendeten Konzept übernimmt die hochpräzise Selbst-Lokalisierungs-Komponente den Anteil der Zugsicherung. Verwendet wird eine ATO der Siemens Mobility GmbH, welche von einer Softwarekomponente, dem ATO-Controller, gesteuert wird.

Im AST-Projekt war der Wechsel zwischen einzelnen Missionen (Fahraufträgen) nicht vorgesehen, da dort nur eine vorher in der ATO fest konfigurierte Mission – ein Teilstück im Streckennetz der ViP – abzufahren war. Im AStriD-Projekt mussten aber die verschiedenen Depot-Szenarien im Wechsel und beliebiger Reihenfolge abgehandelt werden. Hierzu mussten in einem ersten Schritt die Fahr-/Bremskurven für die definierten Strecken im Depot implementiert werden, und dann im zweiten Schritt die Missionsverarbeitungs-Komponente der ATO für flexible Abwicklung der unterschiedlichen Szenarien neu entwickelt werden. Das Ergebnis ist die im Folgenden beschriebene Verarbeitungskette.

### Missionsplaner – die anweisende Komponente

Den Einstieg in die Verarbeitungskette bildet die Missionsplaner-Komponente. Mittels Konfiguration, über eine separate Schicht in der Kartenbereitstellung, sind dieser Komponente alle möglichen, fahrbaren Missionen vorgegeben. Die Auswahlmöglichkeit dieser Missionen wird durch die aktuelle Fahrzeugposition, bereitgestellt durch die Selbst-Lokalisierungs-Komponente, eingeschränkt. Ist einmal eine fahrbare Mission gesetzt, so kann diese gestartet und somit abgefahren werden.

### Segmentplaner – die sicherheitskritische Komponente

Bei dem Segmentplaner handelt es sich um die mittlere Ebene der Missionsverarbeitung. Das initiale Eingangsdatum ist die über den Missionsplaner gesetzte Mission. Ist eine Mission gestartet, so werden hier alle sicherheitskritischen Faktoren zusammengefügt und zu einer Handlungsanweisung für den aktuellen Missionsabschnitt, das sogenannte Segment, verarbeitet. Neben den Karteninformationen – wie Gleisgeometrie, -topologie, Warn- und Kollisionsbereiche, sowie Haltepunkten – der präzisen Fahrzeugposition und -geschwindigkeit, sind dies noch die erkannten Fahrtsignale aus der Signalverarbeitungs-Komponente, sowie die Objekte aus der Hinderniserkennung. Diese Menge an Informationen wird durch ein komplexes Regelwerk in einen einzigen Wert verrechnet, welcher der freien Strecke vor dem Zug entspricht und dem angebotenen

Fahrautomat somit die maximal fahrbare Distanz, unabhängig vom jeweiligen Fall, vorgibt. Man kann vereinfacht sagen, dass "eine ATO nicht weiß, warum oder wofür Sie bremst; Sie weiß nur, dass Sie – in jeden Fall – bremsen muss".

### ATO-Controller – die Regelung des Fahrautomaten

Sind nun alle oben genannten Faktoren überprüft, so wird entweder ein Verbot für die autonome Fahrt erteilt und die Tram in einen sicheren Status überführt, oder es wird die Fahr-Erlaubnis samt freier Strecke vor dem Zug übermittelt. Daraufhin startet die ATO die für die Mission vordefinierten Fahr-/Brems-Kurven, was den Beginn einer autonomen Fahrt oder deren kontinuierliche Weiterfahrt zur Folge hat.

### Missionsverarbeitung- und Überwachung

Wie bereits erwähnt, bedurfte es aufgrund der nun vorhandenen Auswahl an Missionen auch einer Überarbeitung der Missionsverarbeitung-Komponente. Hierzu wurde ein mehrstufiges Regel- und Überwachungskonzept erarbeitet, welches die Möglichkeit bietet, den bereits implementierten Teil als separates Regelungsmodul beizubehalten und abzukapseln. Der bisherige Missionsplaner wurde somit einem neu implementierten Missionssupervisor unterstellt, welcher auf höchster Ebene dem ebenfalls neuen Hypervisor unterstellt ist. Dieses Konzept verlagert die Komplexität von Einzelkomponenten, welche monolithisch mehrere Aufgaben übernehmen, hin zu mehreren kleinen Verarbeitungseinheiten, welche jeweils separat die ihnen gestellte Aufgabe kontrollieren. Der Hypervisor ist somit die zentrale Schnittstelle für Befehlseingänge von außen, also vom BMS. Hierfür wurde ein eigenes Daten-Protokoll entworfen und entsprechend umgesetzt.

Die auszutauschenden Nachrichten wurden den Aufgaben entsprechend definiert:

- „AST Mission“ – zum Senden einer neuen Mission vom Betriebshof-Managementsystem
- „AST Command“ – zum kontrollierten Ausführen einer gesetzten Mission.
- „AST Status“ – der von der AST selbst überwachte (Missions-) Status wird kontinuierlich von der AST an das BMS gesendet, so dass der AStriD-Dispatcher, immer über den aktuellen Stand, inklusive möglicher Fehler, informiert ist.

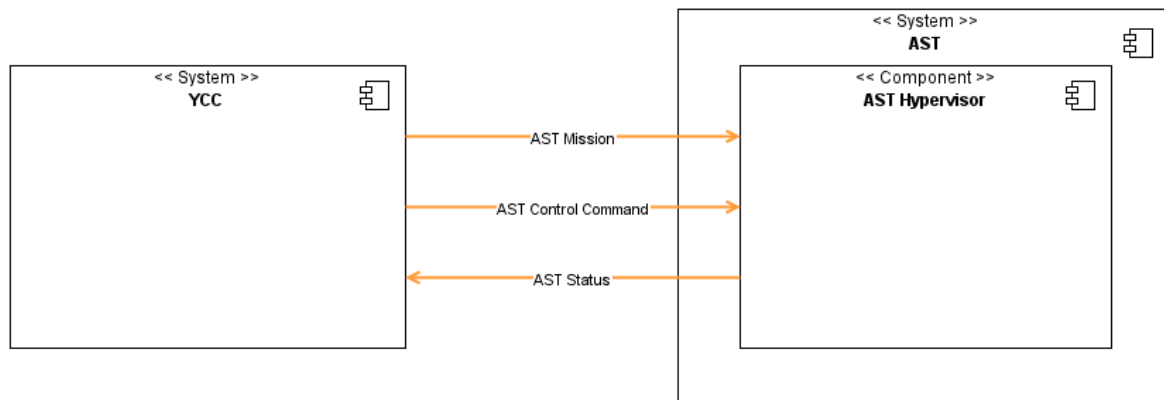


Abbildung 9: Kommunikation zwischen dem Betriebshofmanagementsystem (hier Yard Control Center „YCC“) und der Autonomen Siemens Tram („AST“).

### Hinderniserkennung

Die Hinderniserkennung-Komponente ist grob in 2 Einheiten unterteilt; während die erste Einheit den Warnbereich für die Abfahrt kontrolliert, so übernimmt die zweite Einheit die Funktion der Erkennung von sich in diesen Bereichen befindlichen Hindernissen während der Fahrt.

Zur Überwachung der Kollisions- und Warnbereiche werden mehrere, bereits aus AST vorhandene 3D-Distanzsensoren, auch LiDAR (Light Detection and Ranging) genannt, auf Grundlage einer Sensorfusion verwendet.

Bei der im Rahmen des AST entwickelten Hinderniserkennung handelt es sich um ein rein statisches Verfahren, welches die Geschwindigkeiten der erkannten Objekte nicht weiter betrachtet. Solche Verfahren sind

sehr robust, eignen sich aber, aufgrund der hohen Dynamik im Verkehr, nicht für alle Geschwindigkeitsbereiche. Eine praktische, jedoch nicht weiter analysierte, Grenze von 25 km/h wurde als geeignet für den Betrieb in der Depot-Umgebung angenommen. Das implementierte Verfahren transformiert zuerst die Detektionen der einzelnen Sensoren in einem gemeinsamen Raum. Da alle Sensoren ihre Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufnehmen, bedarf es einer Bewegungskompensation, um diese korrekt zu fusionieren. Die Bewegungskompensation konnte durch eine Koppelung mit der Selbst-Lokalisierungskomponente erreicht werden. Hierbei handelt es sich um eine einfache, wenn auch nicht klassische, Sensorfusion. Sind nun alle Messungen im selben Raum, so können die Messungen anhand ihrer Höhe über dem Gleis gefiltert werden. Danach können die Einzelmessungen zu komplexen Objekten zusammengefügt werden (clustern). Der ausgewählte Clusteralgorithmus basiert auf dem Abgleich der euklidischen Distanz zwischen einer Messung und allen anderen. Ist die ermittelte Distanz kleiner als ein gesetzter Grenzwert, so wird der Punkt dem Cluster hinzugefügt, andernfalls nicht.

Basierend auf den Erfahrungen aus AST, wurde zu Beginn des Projektes die beschriebene Lösung als grundlegend ausreichend betrachtet. Die Herausforderung bestand vielmehr darin, den Algorithmus für die spezielle Depot-Umgebung so zu parametrieren, dass eine Objekterkennung mit möglichst hoher Wahrscheinlichkeit sichergestellt wird, diese Empfindlichkeit aber dennoch nicht zu viele Fehlwarnungen verursacht und so als störend empfunden wird.

Bei den Testfahrten innerhalb der Depot-Gebäude wurde jedoch festgestellt, dass der bestehende Clusteralgorithmus über keine Begrenzung der Clustergröße verfügte. Das hatte zur Folge, dass bei der Zufahrt auf ein Gebäude wie z.B. die Wartungshalle, dieses als zusammenhängendes, massives Objekt erkannt wurde. Bei der Einfahrt in das Gebäude interpretiert die Hinderniserkennung dann fälschlicherweise eine Kollision mit dem Gebäude. Zur Lösung des Problems wurde eine Begrenzung der Clustergröße auf plausible, zu erwartende, Objektgrößen implementiert. Somit wurden die Gebäude nicht mehr als Hindernis klassifiziert.

Neben der erwähnten Cluster-Distanzgrenze, erwiesen sich die gefilterte Höhe, sowie die minimale Clustergröße, als weitere – zwingend notwendig – zu optimierende Parameter.

### *Signalerkennung*

Die *Signalerkennung*-Komponente basiert auf einem Machine Learning Algorithmus, welcher auf die Signale und deren Positionen der vormaligen AST-Teststrecke trainiert ist. Die Ausweitung der Teststrecke im Rahmen des AStriD-Projektes auf den Betriebshof mit den dort vorhandenen Lichtsignalen, sowie eine Erneuerung der Lichtsignaltechnik, auch auf dem Betriebshof, von Glühlampen zu Leuchtdioden, mit der damit verbundenen Farbtemperaturänderung, bedurften einer erneuten Anlernphase für den Algorithmus.

### *Selbst-Lokalisierung*

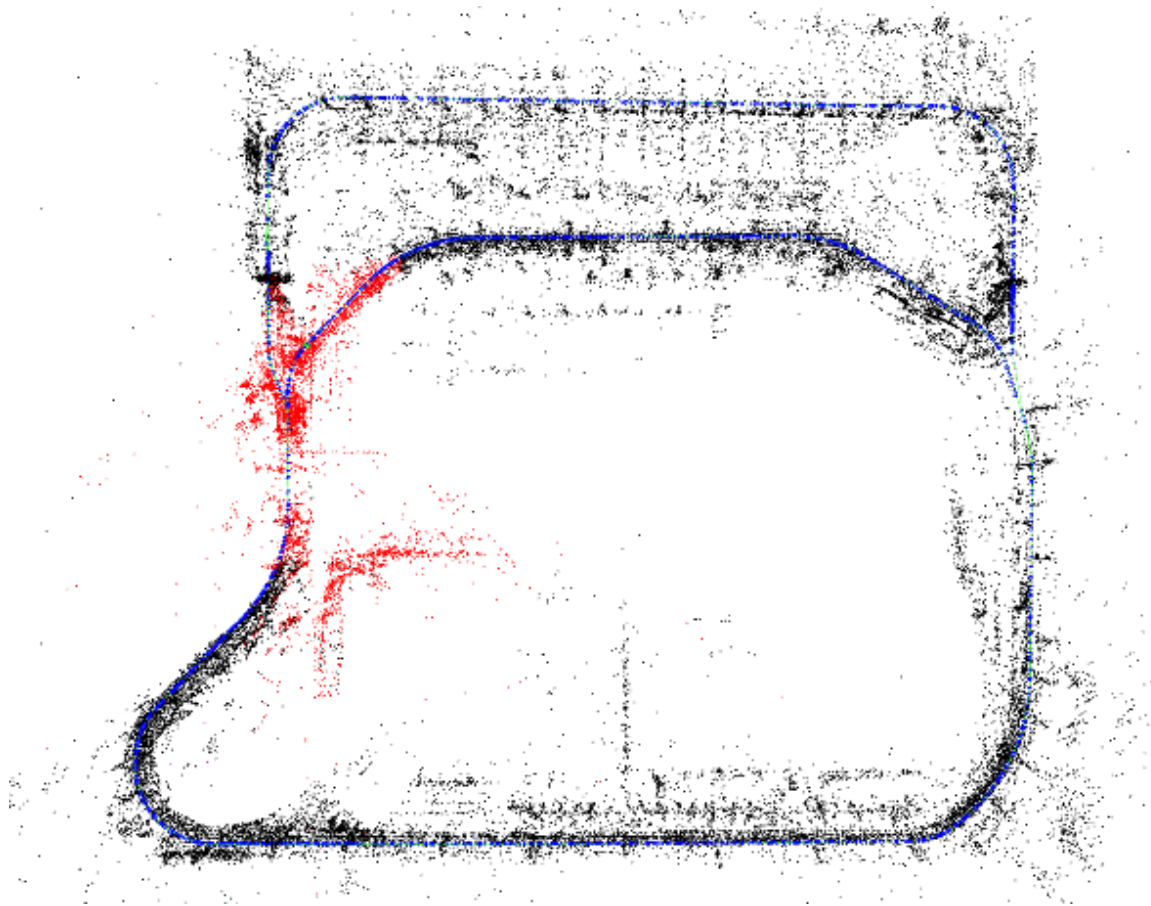
Die Selbst-Lokalisierungs-Komponente der AST besteht aus einem klassischen GNSS-Lokalisierungssensor, und einem nachgelagerten „Kartenabgleichs“-Algorithmus, welcher die Messung mit der Karte fusioniert. Diese Methode stellte sich aufgrund des in überdachten Bereichen mangelhaften oder ganz fehlenden GNSS-Empfanges (wie z.B. Abstellhallen oder Werkstatt-Gebäuden) für den Betrieb innerhalb eines Straßenbahn-Depots als ungeeignet heraus.

Da es aktuell auf dem Markt nur infrastruktur-basierte Lösungen für dieses Problem gibt, diese aber für zukünftige Fahrten auch im öffentlichen Straßenbahnnetz (wo es ebenfalls in Tunneln oder engen Straßenschluchten GNSS-Einschränkungen geben kann) nicht als zukunftsfruchtig erachtet wurden, musste im Rahmen des Projektes für eine zuverlässige Selbst-Lokalisierung in Bereichen mit nicht vorhandener GNSS-Signalabdeckung eine innovative Lösung entwickelt werden. Nachdem das Fahrzeug bereits mit einer Vielzahl an orthogonaler – sich ergänzender – Sensortechnik ausgestattet war, boten sich mehrere Ansätze unter Verwendung dieser ohnehin vorhandenen Sensoren zur Lösung an. Hierbei wurden nur Verfahren in Betracht gezogen, welche auch das Kartenmaterial zu Selbst-Lokalisierung erzeugen können. Typischerweise sind dies sogenannte SLAM-Verfahren (Simultaneous Localization and Mapping), von denen die in die engere Auswahl aufgenommenen und getesteten Verfahren nachstehend beschrieben und die jeweiligen Test-Ergebnisse bewertet werden.

### ORB-SLAM 2 Kartierung & Lokalisierung

Bei dem ORB-SLAM Verfahren<sup>2</sup> handelt es sich um eine Verknüpfung zwischen einem bildbasiertem Merkmalsdetektor und einem Graphen-basiertem Kartierungsalgorithmus. Die Abkürzung ORB steht für "Oriented FAST and Rotated BRIEF". Hinter "FAST"<sup>3</sup> verbirgt sich der Merkmalsdetektor "Features from accelerated segment test" und hinter "BRIEF" die Merkmalsbeschreibung "Binary Robust Independent Elementary Features". Wie der Namensbestandteil schon erahnen lässt, handelt es sich um einen Echtzeit-fähigen Ansatz, welcher für die zu lösende Aufgabe zwingend ist.

Das nachfolgende Bild zeigt eine Kartierung sowie ein Lokalisierungsergebnis. Die blauen Markierungen entsprechen den Positionen, an denen die Kartenmerkmale, welche durch die schwarzen Punkte repräsentiert werden, registriert, bzw. verarbeitet, wurden. Im Groben entsprechen die blauen Markierungen somit den Pfad bzw. das Gleis, welches zum Kartieren verwendet wurde, und die schwarzen Punkte der Umgebungsstruktur. Die roten Punkte entsprechen den im aktuellen Zeitschritt erkannten und verarbeiteten Merkmalen. Einfach gesagt entspricht eine richtige Selbst-Lokalisierung nun der richtigen Zuordnung zwischen roten und schwarzen Punkten.



**Abbildung 10: Beispiel Kartierung ViP-Betriebshof "ORB SLAM v2"**

Aufgrund der wie schon im Beispielbild zu erkennenden absoluten Ungenauigkeit der Karten, sowie der zu erwartenden Beeinträchtigung bei sich zu stark verändernder Umgebungsbeleuchtung, wurde das Verfahren als ungeeignet betrachtet und für einen Einsatz im AStriD-Projekt verworfen.

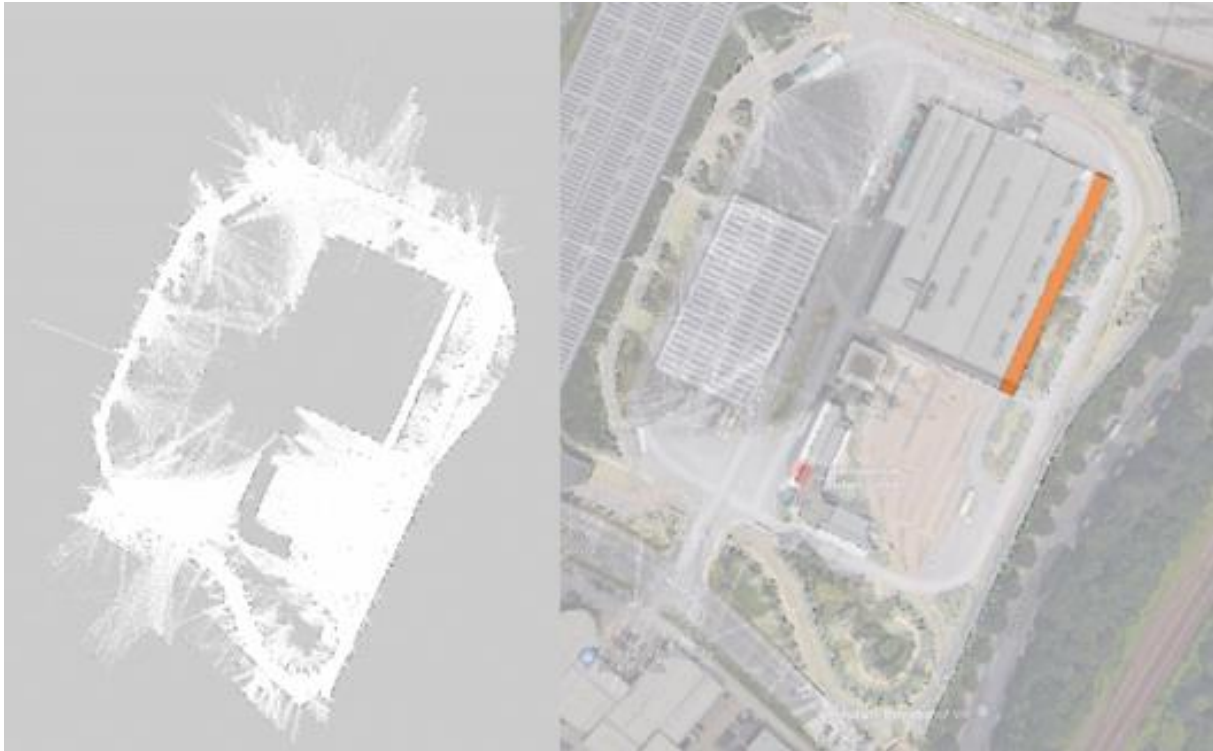
<sup>2</sup> Raúl Mur-Artal, J. M. M. Montiel, Member, IEEE, and Juan D. Tardos, Member, IEEE: "ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System", in IEEE Transactions on Robotics, 2015 (Volume: 31, Issue: 5, October 2015)

<sup>3</sup> Edward Rosten, Reid Porter, and Tom Drummond: "Faster and better: a machine learning approach to corner detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (Volume: 32, Issue: 1, January 2010)



### Verallgemeinerte Kartierung & Adaptive Monte-Carlo-Lokalisierung

Das Verfahren der verallgemeinerten Kartierung und dessen Referenzimplementierung "gmapping"<sup>4</sup> waren über lange Zeit der quasi-Standard für 2D Kartierung mit Distanzsensoren. Ebenso der dazugehörige Lokalisierungsansatz der "adaptiven Monte-Carlo Lokalisierung"<sup>5</sup> und dessen Referenzimplementierung "amcl"<sup>6</sup>. Die Grundlage bildet ein spezieller Bayes-Filter, der Partikel-Filter<sup>7</sup>, welcher auch sequenzielle Monte-Carlo Methode genannt wird. Zur Analyse wurde der Filter zur Benutzung eines Bewegungsmodells nach Thrun<sup>8</sup> und eines Strahlen-Endpunkt-Sensormodells, zur Modellierung der Entfernungsmessungen, konfiguriert.



**Abbildung 11: Beispiel Kartierung ViP-Betriebshof "gmapping" (links) und transparent über Satellitenbild von Google Maps (rechts); Waschstraße orange hervorgehoben**

Obwohl die Ergebnisse der Kartierung vielsprechender waren als beim vorherigen Ansatz, so waren sie dennoch nicht ausreichend für die geforderte Selbst-Lokalisierungsgenauigkeit. Allerdings wären sie für große Teile des zu kartierenden Bereichs, nämlich die oberflächlich planaren, sogar ausreichend, jedoch versagt der Ansatz bei den Steigungen auf dem Gelände. Von den im Durchschnitt wenigen Zentimetern an Fehler, springt die Ungenauigkeit hier auf ein Maximum von bis zu 5 Metern, welches die Anforderungen an die Kartengenauigkeit um ein Vielfaches verfehlt. Ungeachtet dessen, konnten innerhalb der "ungenauen" Karte, Selbst-Lokalisierungsergebnisse innerhalb der gewünschten Genauigkeit erreicht werden. Die Möglichkeit einen Partikel-Filter als Selbst-Lokisierungsalgorithmus zu verwenden, wurde ab diesem Zeitpunkt in Betracht gezogen.

<sup>4</sup> Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss, and Wolfram Burgard: "Improved Techniques for Grid Mapping with Rao-Blackwellized Particle Filters", in IEEE Transactions on Robotics, Volume 23, 2007 and Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss, and Wolfram Burgard: "Improving Grid-based SLAM with Rao-Blackwellized Particle Filters by Adaptive Proposals and Selective Resampling", In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2005

<sup>5</sup> Frank Dellaert, Dieter Fox, Wolfram Burgard and Sebastian Thrun: "Monte Carlo Localization for Mobile Robots", Conference Paper, Proceedings of (ICRA) International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, May, 1999

<sup>6</sup> Brian P. Gerkey: "amcl is a probabilistic localization system for a robot moving in 2D" in <http://wiki.ros.org/amcl>

<sup>7</sup> Sequenzielle Monte-Carlo-Methode, [https://de.wikipedia.org/wiki/Sequenzielle\\_Monte-Carlo-Methode](https://de.wikipedia.org/wiki/Sequenzielle_Monte-Carlo-Methode)

<sup>8</sup> Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox: "Probabilistic Robotics" in MIT Press, 2005.

### Cartographer Kartierung & Lokalisierung

Das letzte Verfahren, welches näher analysiert wurde, hat sich in den vergangenen Jahren als neuer Standard etabliert und wurde daher auch im Rahmen des AStriD-Projektes betrachtet. Hierbei handelt es sich um eine Graph-basierte Lösung, welche modernste Ansätze der Punktwolkenverarbeitung mit etablierten Optimierungsverfahren aus der Graphen-Theorie verbindet. Die Referenz-Implementierung "Cartographer" ist mit finanzieller Unterstützung der Firma Google entstanden und für die Allgemeinheit frei verfügbar.

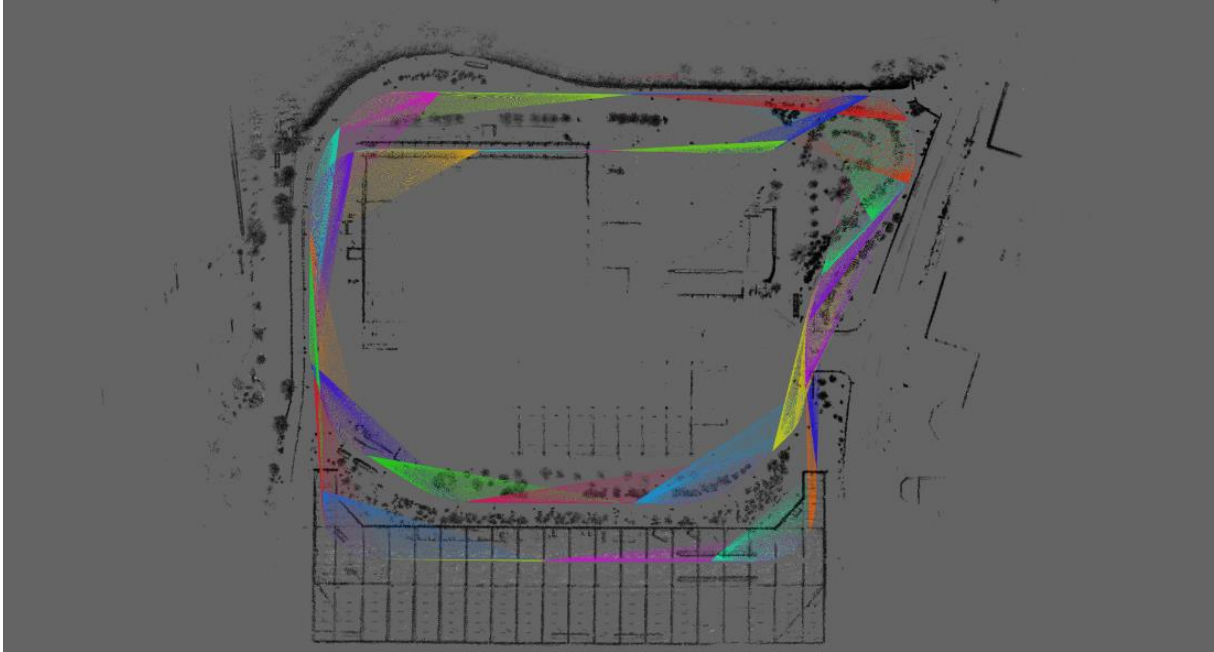


Abbildung 12: Beispiel Kartierung ViP Betriebshof "Cartographer". Dargestellt ist der Verbindungsgraph zwischen den lokalen Karten (farbige Linien) und deren fusionierte Einzelmessungen (schwarze Punkte).

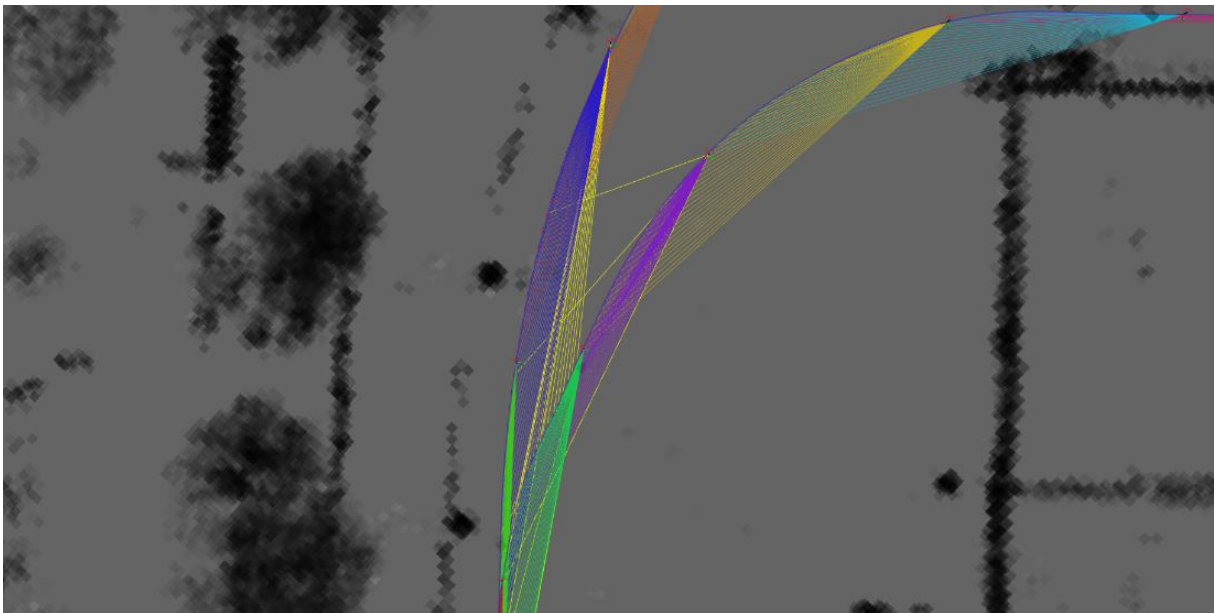


Abbildung 13: Beispiel Kreisschluss (Loop-Closure) "Cartographer". Die vereinzelt gelben Linien zwischen den zwei blauen Spuren zeigen die Verknüpfung zwischen zwei nicht aufeinander folgenden, lokalen Karten an.



**Abbildung 15: Beispiel Kartierung ViP Betriebs-hof "Cartographer" (unoptimiert).** Die roten und grünen Punkte zeigen jeweils den verarbeiteten linken oder rechten Lidar. Bei genauer Betrachtung ist ein Offset zwischen Start- und Endpunkt zu erkennen, was auf eine sub-optimale Konfiguration zurückzuführen ist.



**Abbildung 14: Beispiel Kartierung ViP Betriebs-hof "Cartographer" (optimiert).** Eine genaue Betrachtung zeigt, dass der Offset zwischen Start- und Endpunkt minimal ist.

Das analysierte Verfahren zeigte schon ohne Optimierung auf das Sensorset beachtliche Ergebnisse. Die zuvor erfahrenen Schwierigkeiten mit Steigungen und Senken traten hier nicht, oder nur geringfügig, in Erscheinung.

Trotz dieser bemerkenswerten Ergebnisse im Kartierungsbereich, konnte das Resultat des mitgelieferten Lokalisierungsansatzes nicht überzeugen. Ob dies an dem Verfahren an sich oder einer falschen Konfiguration lag, konnte im Rahmen des AStriD-Projektes nicht ermittelt werden.

### Implementierte Lösung

Die implementierte Lösung verwendet das oben erwähnte Verfahren der "adaptiven Monte-Carlo Lokalisierung", das unter der Einbeziehung der vorangegangenen Analysen ausgewählt wurde. Die Implementierung stellt den ersten vollständigen Ansatz zur Lösung des Selbst-Lokalisierungsproblems innerhalb des AStriD-Projektes dar.

Zu dem bestehenden Kartensystem der AST wurde eine weitere Ebene hinzugefügt: 2D-Rasterkarten, die ebenfalls von "Cartographer" generiert werden können. Jede Zelle in den 2D-Rasterkarten stellt die Wahrscheinlichkeit dar, dass sich dort ein Objekt befindet. Die implementierte Lokalisierung kann die Lidar-Scans mit der Karte abgleichen und auf dieser Basis die aktuelle Position der Straßenbahn ermitteln. Durch die Beschränkung des Lidar-Scans auf einen definierten Höhenbereich oberhalb typischer dynamischer Objekte wie Autos oder Personen wird verhindert, dass durch diese die Lokalisierung beeinträchtigt wird. Die Positionierung des Lidar-Sensors auf dem Dach der Straßenbahn garantiert, dass die Lidar-Scans den gewählten Höhenbereich gut abdecken.

Eine Konfigurationsoptimierung führte nun auch zum Erreichen der angeforderten Genauigkeit, sodass ein wiederholbares, korrektes Stoppen des Fahrzeugs an den gewünschten Haltepositionen mit einer Abweichung von weniger als 0.1 Metern, z.B. im Bereich der Waschstraße, erreicht wurde. Dies ist besonders hervorzuheben, da die ADAS-Software der AST aus Sicherheitsgründen keinen direkten Zugriff auf die Motorsteuerung des Fahrzeugs hat und sich somit eine weitere, algorithmisch auszuwertende Totzeit einstellt,

welche sich direkt auf das Anhalten und damit auch den Haltepunkt auswirkt. Obwohl anfänglich ein genauigkeitsbasierter Wechsel zwischen den nun verfügbaren Selbst-Lokalisierungslösungen implementiert wurde, stellte sich – nach monatelanger Erprobung – die Robustheit der kartenbasierten Lösung heraus, woraufhin auf die Verwendung der Lösung auf GNSS-Basis für den Betriebshof komplett verzichtet wurde.

### Kartenbereitstellung

Die *Kartenbereitstellung*-Komponente der AST, war dahingehend modular implementiert, dass sie einen Austausch des bereitgestellten Kartenmaterials im Allgemeinen ermöglichte. Dies musste allerdings offline durch manuelles Aufspielen erfolgen. Ein automatisierter Kartenaustausch bei laufendem System mit unmittelbarer Verwendung der neuen Karte als Reaktion auf eine veränderte Infrastruktur war nicht vorgesehen und wurde im Rahmen des AStriD-Projektes neu entwickelt.

Hierfür wurde teilweise auf bereits existierende Lösungen anderer Siemens-Unternehmensbereiche zurückgegriffen. Im speziellen wurde eine API (Application Programming Interface) verwendet, welche einem Software-Anwender einen einheitlichen Zugriff auf Bahnsysteme gewährt. Der hier implementierte Algorithmus beginnt mit den vorverarbeiteten Kartendaten. Zur Vorverarbeitung gehören zum einen die Aktualisierung der Referenzkarten sowie das Homogenisieren der Datenstrukturen, und zum anderen das Paketieren der Daten sowie deren Bereitstellung über einen kompatiblen Paketserver. Für deren Implementierung wurde auf bestehende Anwendungen aus dem verwendeten Betriebssystemumfeld zurückgegriffen, genauer, das Debian Paketverwaltungssystem. Die Implementierung des Paketserver erfolgte im Data-Hub. Der Zugriff auf die bereitgestellte API erfolgt durch das Betriebshof-Managementsystem.

Somit wurde der im Folgenden beschriebene Ablauf für den Kartenaustausch implementiert:

### Aktualisieren der Paketverwaltung

Zu Beginn eines Kartenaustausches wird der AST-lokale Paketserver aktualisiert. Dies geschieht über Fernzugriff gesteuert vom Softwareanwender. Dieser, nach außen hin simple Prozess, kapselt verschiedenste unterliegende Schichten ab, so dass Sie dem Benutzer verborgen bleiben. Das nachfolgende Diagramm gibt einen Überblick.

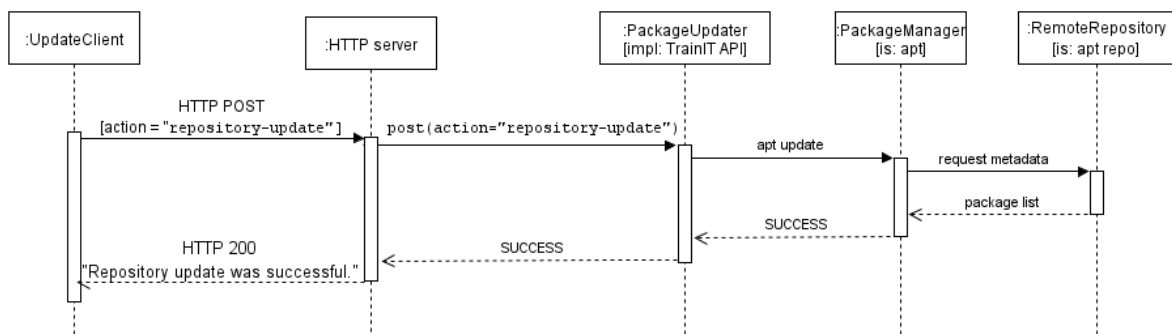


Abbildung 16: Ablauf "Aktualisierung der Paketverwaltung"

### Statusabfrage Paketverwaltung

Da es unter Umständen vorkommen kann, dass mehrere Karten gleichzeitig vorgehalten werden, wurde eine Fernabfrage hierfür implementiert. Die aktuell verfügbaren Kartenpakete können nun ebenfalls vom Fernanwender abgefragt werden. Falls es beispielsweise zu einer automatischen Kartenaktualisierung durch einen externen Partner, wie hier im Projekt durch die Bearbeitung des Karten-Arbeitspaketes dargestellt kam, so wäre diese Aktualisierung nun für den Fernanwender sichtbar.

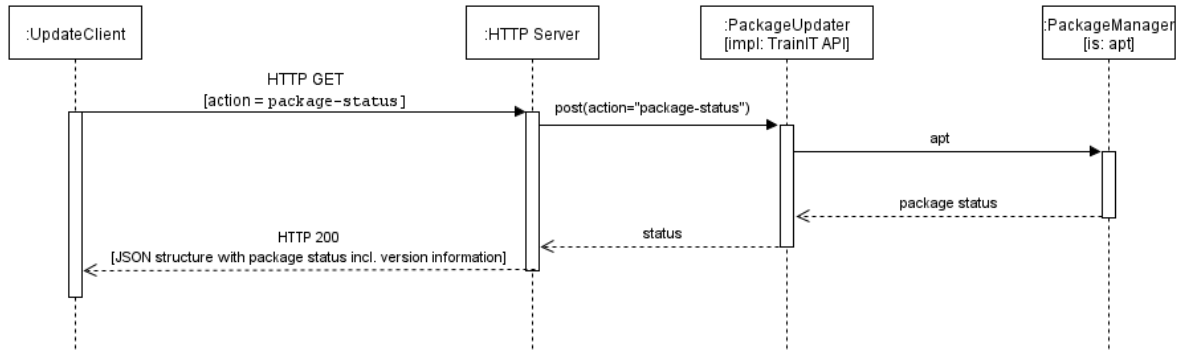


Abbildung 17: Ablauf "Statusabfrage Paketverwaltung"

### Kartenaktualisierung

Die Aktualisierung der Karte ist analog zu den vorher beschriebenen Prozessen umgesetzt. Als Besonderheit ist hier die mehrstufige Fehlerkategorisierung hervorzuheben. Aufgrund der asynchron verlaufenden, unterliegenden Prozesse kann es zu einer erfolgreichen Ausführung des Fernzugriffs kommen, was bedeutet das der Installationsprozess erfolgreich gestartet wurde, während, zum Beispiel, der nachgelagerte Schreibprozess auf der Festplatte immer noch fehlschlagen kann. Dem Fernanwender würde dann ein Fehlschlagen der Installation über den allgemeinen Systemstatus mitgeteilt werden.

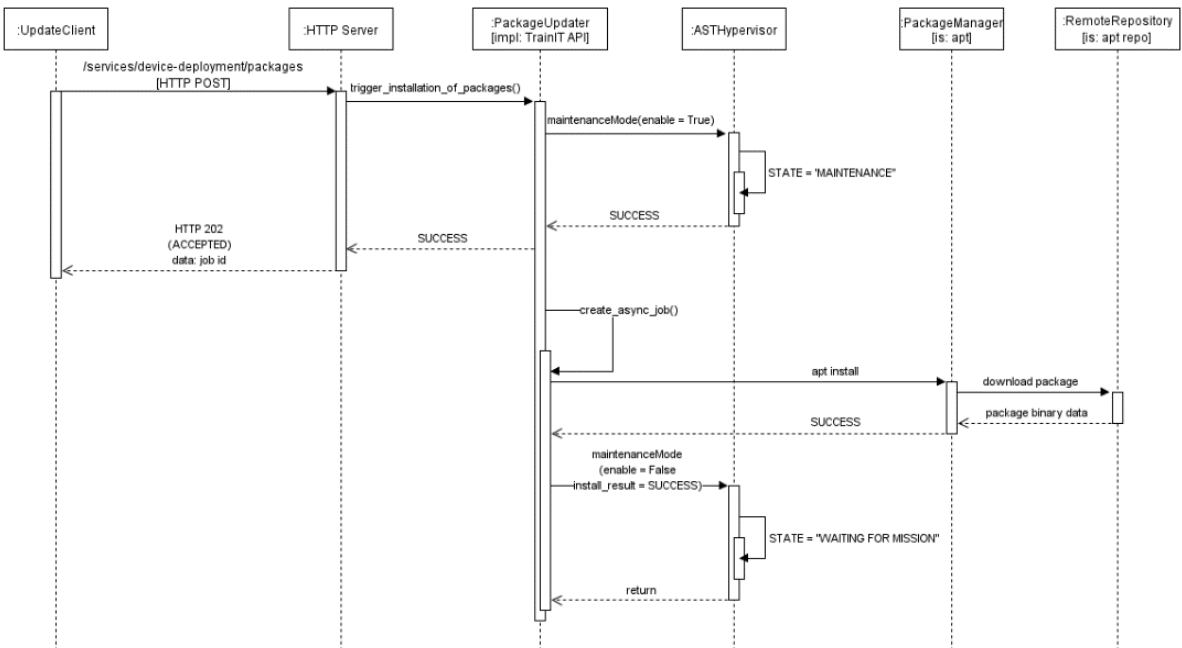


Abbildung 18: Ablauf "Erfolgreiche Kartenaktualisierung"



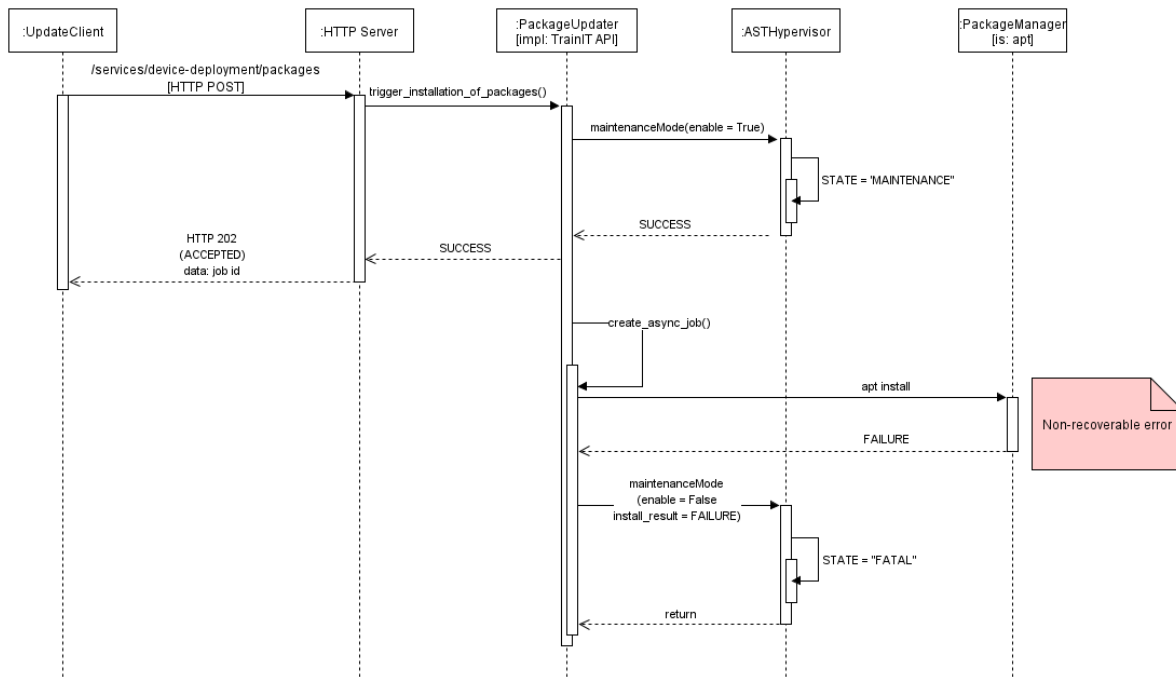


Abbildung 19: Ablauf "Kritisch fehlgeschlagene Kartenaktualisierung"

### Nutzung des zusätzlichen "Point of Interest"-Karten-Layers

Die aktive Nutzung der im Vergleich zur Basis-Karte nun ergänzten PoI-Informationen gestaltete sich als Herausforderung, da große Teile der bisherigen Implementierung den sicherheitskritischen Pfad des automatischen Zugsteuerungsprozesses Automatic Train Operation (ATO) betreffen und unter keinen Umständen modifiziert bzw. manipuliert oder ausgetauscht werden durften. Um die neu generierten PoI-Kartendaten dennoch maximal nutzen zu können, wurde im ADAS-System eine weitere Verarbeitungseinheit implementiert. Diese registriert neu in der Gleisumgebung platzierte, vorher antrainierte PoI-Kartenobjekte, gleicht diese mit den in der Basis-Karte hinterlegten Referenzwarnbereichen ab und passt diese bei Bedarf an.

Die in der digitalen Karte bereitgestellten PoI-Informationen beinhalten dazu eine global referenzierte Pose, bestehend aus Position und Orientierung, sowie einen Begrenzungsrahmen im lokalen 3D-Raum. Durch die gegebene Voraussetzung, dass sich beide Kartendaten im selben physikalischen System befinden, wird nun eine Projektion der Begrenzungsrahmen in den 2D-Raum der Warnbereiche durchgeführt, um diese wiederum abgleichen zu können. Eine mögliche Überschneidung der Bereiche wird anhand des "Intersection over Union"-Algorithmus ermittelt. Wurde eine Überschneidung festgestellt, so wird der Referenzwarnbereich um den Bereich des statischen Objektes verkleinert.

Somit wird auf ein für die autonome Fahrt ungefährliches, weil als statischer PoI identifiziertes, Element nicht mehr fälschlicherweise mit Warnklingeln oder gar Bremsen reagiert, obwohl es im vorher festgelegten Warnbereich positioniert ist.

Diese Funktionalität ist für alle kartierbaren, statischen Objekte denkbar, wurde aber nur beispielhaft für den Fall von klassischen Baustellenmarkierungen, die im Kapitel zur digitalen Karte noch näher beschriebenen Objekte „Verkehrsbake“ und „Schrankenzaun“ implementiert (Meilenstein „Bereitstellung Integrations-Release 2, Anteil Integration der digital Map advanced“) und demonstriert (Meilenstein “Verifikation R2, Anteil Integration digital Map advanced, abgeschlossen”).

Der implementierte Ablauf verläuft wie folgt:

- Neues annotiertes, statisches Objekt wird in Warnzone platziert
- Tram klingelt, da Verletzung der Warn-Zone erkannt wird
- Sensordaten werden zur Kartenaktualisierung in das KI-Modell eingespeist
- Objekt wird vom KI-Modell erkannt, identifiziert und festgestellt, dass es als statisch beschrieben ist



- Warn-Zone wird manuell angepasst und um das Objekt verringert
- Karte wird bereitgestellt und nach Anforderung durch BMS über LAN auf Fahrzeug aufgespielt
- Tram klingelt das Objekt nicht mehr an

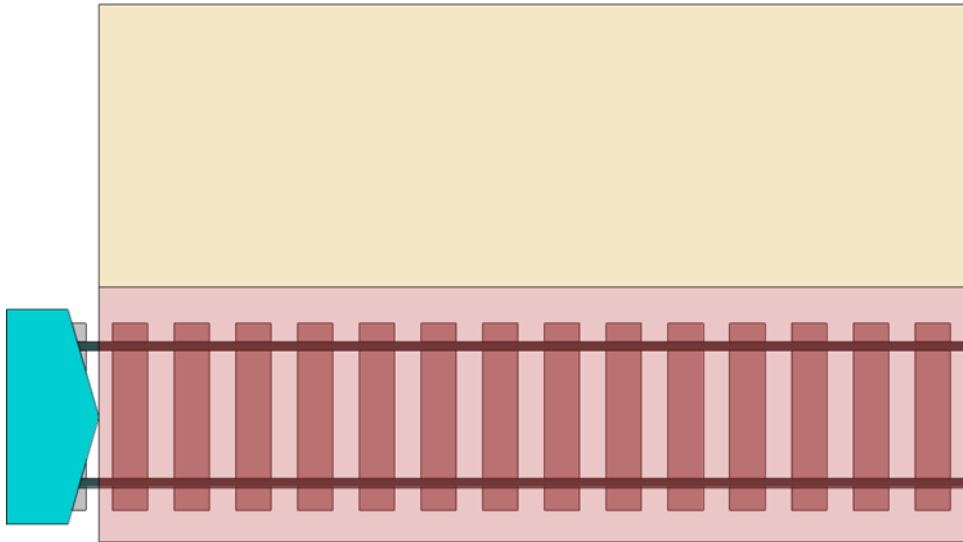


Abbildung 20: Schematische Darstellung von Kollisions- (Rot) & Warnbereich (Gelb/Orange) vor dem Schienenfahrzeug (Petrol).

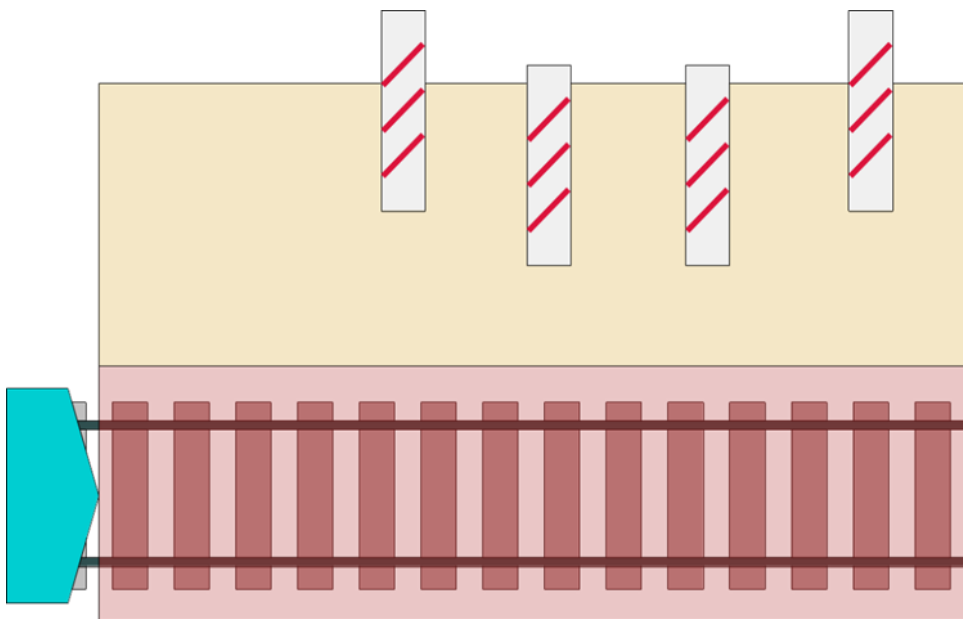
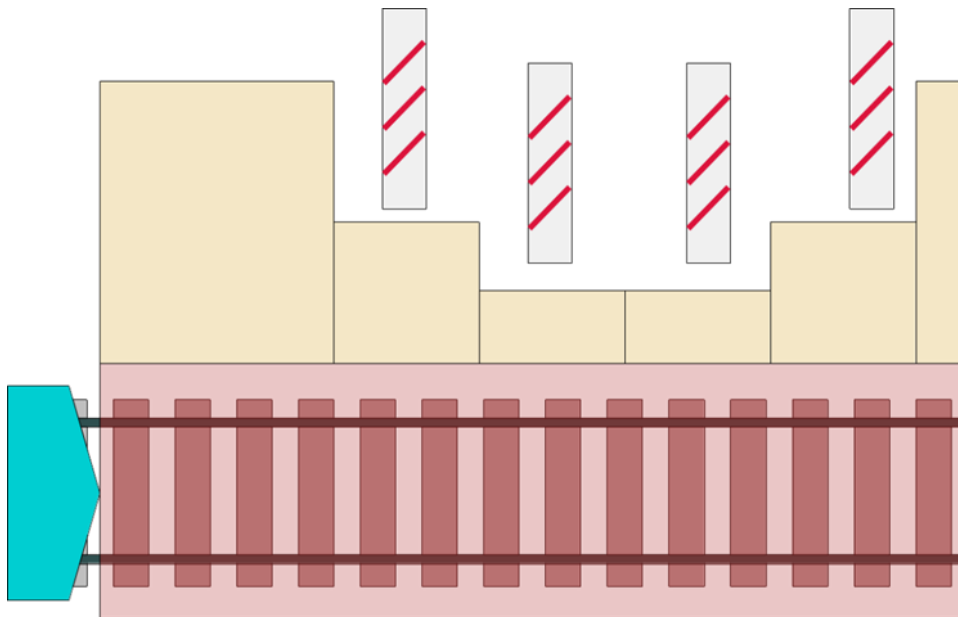


Abbildung 21: Schematische Darstellung eines Warnereignisses bei statischen Objekten (Verkehrsbake).



**Abbildung 22: Schematische Darstellung des um die Größe der statischen Objekte verkleinerten Warnbereichs**

### *Datenaufzeichnung*

Die Datenaufzeichnung-Komponente der AST beruht auf den gegebenen Lösungen der verwendeten Middleware, hier ROS (Robotic Operating System, Version 1). Das verfügbare Aufnahmeprogramm speichert die Daten in einer Mischung aus eigenen, proprietären und standardisierten Middleware Nachrichten im "rosbag" Format.

### *Optimierung Sensorset*

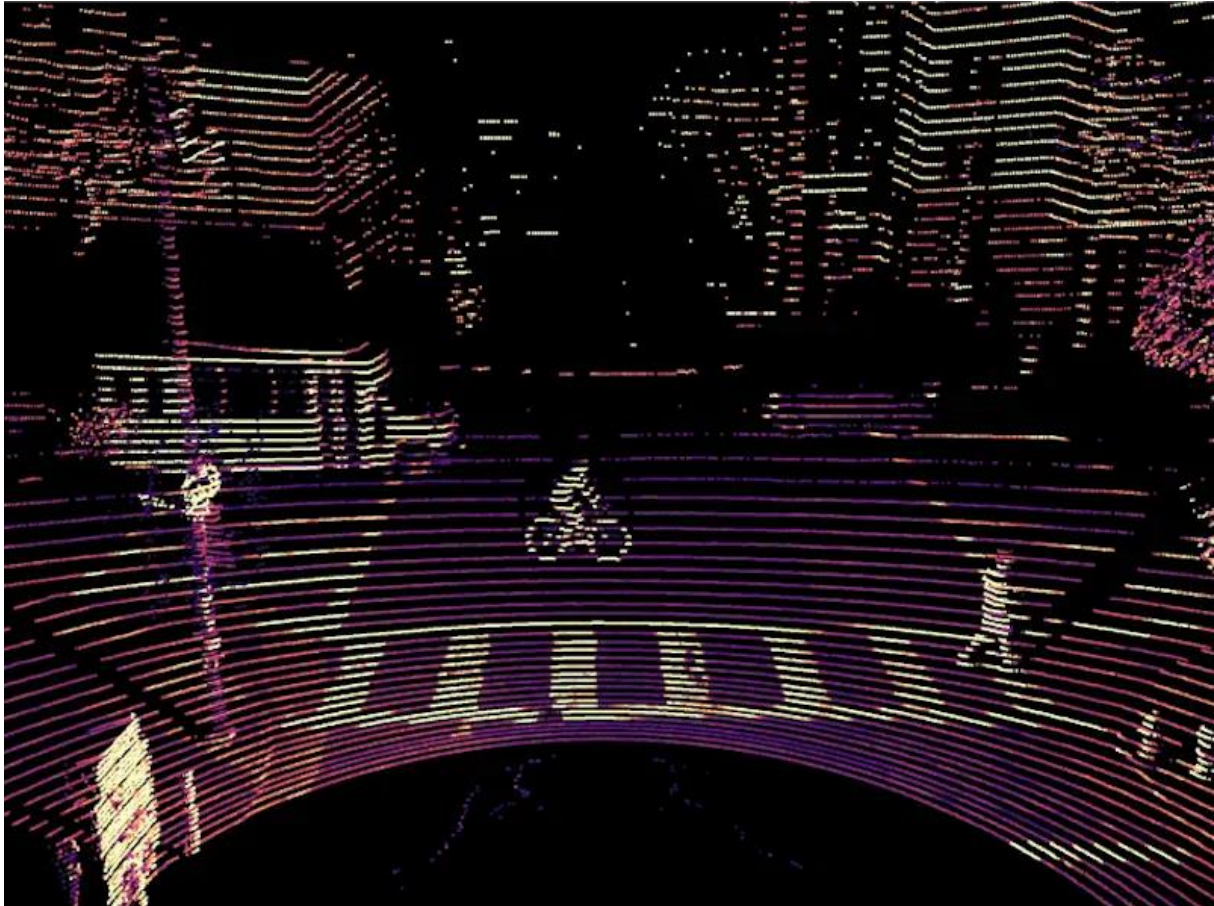
Die verwendeten Sensor-Technologien genügte zwar dem eigentlichen Projektziel der prototypischen Demonstration des autonomen Fahrens im Depot, insbesondere die Lidar-Technologie entwickelt sich aber sehr rasch weiter und bietet in sehr kurzen Innovationszyklen immer höhere Leistungsfähigkeiten. Deshalb war es sinnvoll, Optimierungsmöglichkeiten des Sensorsetups zu untersuchen. Die betrachteten Optimierungen betreffen Änderungen an der Hardware an sich, sowie auch neuartige Software-Lösungsansätze, welche bestehende Sensoren wiederverwenden und andere "einsparen" können. Gerade die aufstrebende Machine Learning Technologie "Deep Learning", kann hier – trotz der erwartbaren Schwierigkeiten bei möglichen Zulassungen – einen großen Beitrag leisten. Im Allgemeinen sollte erreicht werden, die Anzahl der Sensoren von bisher mehr als 10 auf weniger als 4 zu reduzieren. Das Sensorsetup sollte weiterhin heterogen sein, das heißt aus mindestens 2 verschiedenen Sensormodalitäten, zum Beispiel "Kamera und Lidar", "Kamera und Radar" oder "Lidar und Radar", bestehen.

### *Objekterkennung*

Die Untersuchung zur Optimierung des Sensorsetups mit Bezug zur Objekterkennung wurde in 2 Iterationsstufen durchgeführt. Aufgrund der nicht den Anforderungen genügenden Ergebnisse der ersten Stufe, musste sie um eine zweite Phase ergänzt werden.

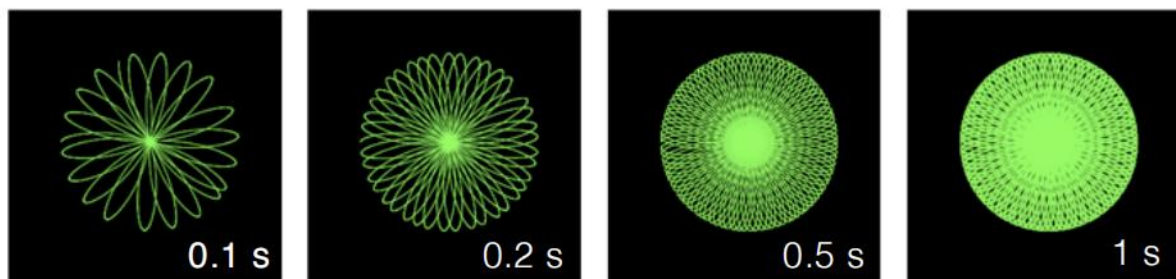
Die erste Stufe umfasste das Verkleinern des Sensorsetups auf einen Lidar und eine Kamera. Das Setup wurde in 2 Varianten evaluiert: Die erste Variante arbeitete mit einem Lidar-Sensor mit regulärem Scan-Muster, während die zweite Phase mit einem Lidar-Sensor mit irregulärem Scan-Muster durchgeführt wurde. Beide Lidar-Sensoren waren in der Lage, die Testobjekte auch auf weite Distanz erstmalig zu detektieren. Trotzdem verhielt sich die gesamte Erkennung nicht stabil, d.h. im Laufe einer weiteren Annäherung wurde das Testobjekt immer wieder „verloren“ und dann wieder regulär erfasst, bis das Objekt erst in einer für den Anwendungsfall zu geringen Distanz stabil erkannt wurde.

Im Falle eines Lidar-Sensors mit regulärem Scan-Muster, ist dies durch die Fehlstellen (Lücken) in der vertikalen Auflösung zu erklären (s. Abbildung 23). Ist ein zu detektierendes Objekt kleiner als die Auflösung, so wird es dementsprechend nicht detektiert. Dieser Effekt wird umso relevanter, je weiter das Objekt entfernt ist. Die Fehlstellen können nur durch weitere Scans aus anderen Positionen, also durch zusätzliche Sensoren, gefüllt werden. Dies ist jedoch im Sinne einer kostengünstigen Lösung nicht zielführend.

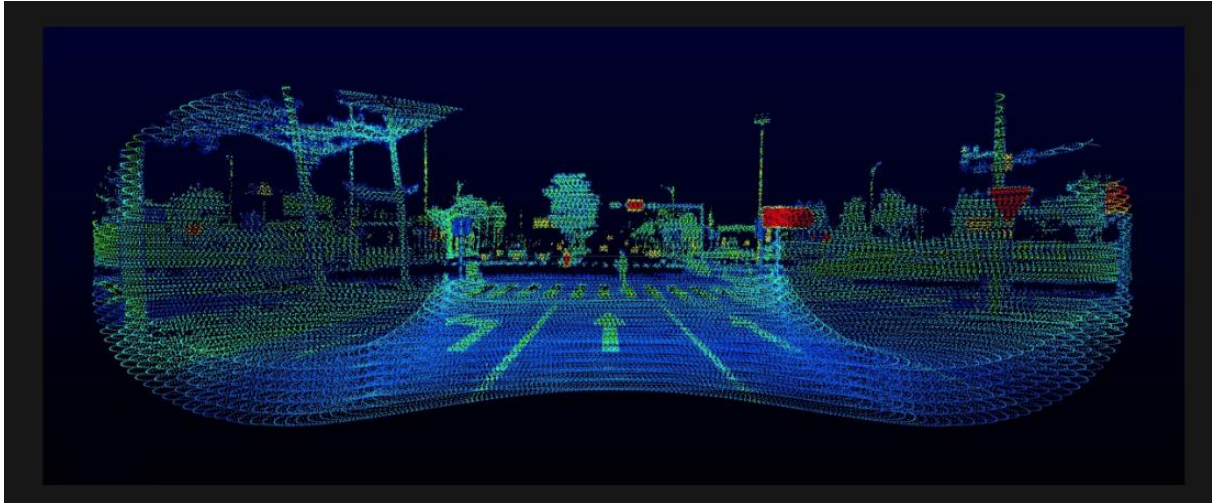


**Abbildung 23: Beispiel eines regulären Musters – klar zu erkennen sind die einzelnen Ebenen des Sensors und die Fehlstellen dazwischen.**

Bei einem Lidar mit irregulärem Scan-Muster, trat ein ähnlicher Effekt auf, der durch die Spärlichkeit der Messpunkte über einen bestimmten Zeitraum zu erklären ist, da nicht alle Erfassungsbereiche des Sensors in gleicher Häufigkeit erfasst werden (s. Abbildung 24 und Abbildung 25).

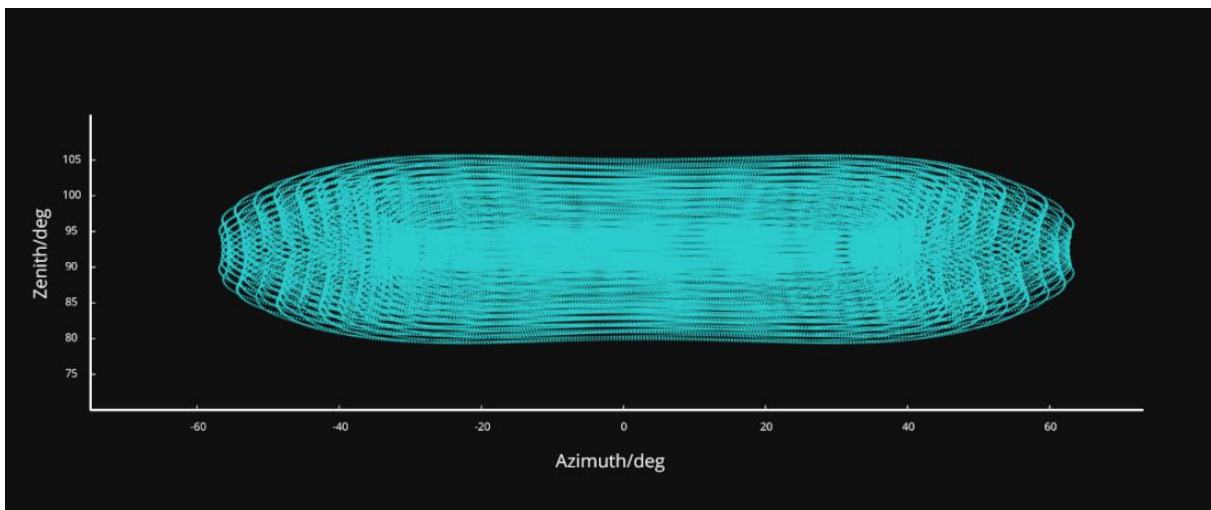


**Abbildung 24: Beispiel einer zeitlichen Integration eines irregulären Scan-Musters.**



**Abbildung 25:** Beispiel eines irregulären Musters über einen Zeitraum von mehreren Sekunden – zu erkennen sind stark und schwach hervorgehobene Bereiche, wobei schwächere Bereiche seltener gemessen wurden.

Auf Grundlage der Ergebnisse der ersten Stufe wurde ein zweites Sensorsetup mit dem Ziel erstellt, die Unzulänglichkeiten des ersten Sensorsetups zu beheben. Aufgrund von Weiterentwicklungen im Bereich der Lidar-Sensorik, standen neuartige Lidar-Sensoren zur Verfügung, welche auf einen Betrieb im Automotive Bereich konzipiert sind. Die in der ersten Stufe evaluierten Lidar-Sensoren wurden daher durch zwei Lidar-Sensoren dieser neuen Klasse ersetzt. Beide neuen Sensoren verwenden ein irreguläres Scan-Muster, welches speziell auf den Anwendungsbereich der Hinderniserkennung für das autonome Fahren angepasst ist und das Problem der Spärlichkeit damit drastisch reduziert (s. Abbildung 26).



**Abbildung 26:** Irreguläres Scan-Muster eines Sensors der zweiten Phase mit weitgehend gleichmäßig gemessenen Bereichen.

Aus zeitlichen Gründen konnte die Evaluierung des zweiten Sensorsetups nicht bis zum Projekt-Ende final abgeschlossen werden. Es kann trotzdem auf Basis der bereits vorliegenden Ergebnisse angenommen werden, dass das zweite Sensorsetup eine deutliche Verbesserung darstellt und das Potential für die Nutzung in einem künftigen Produktiv-System besitzt.

## Digitale Karte

### *Kurzbeschreibung des Arbeitspaketinhalts*

Um nach dem Ausscheiden des initialen Projektpartners Mapillary den Zeitplan für die Realisierung des autonomen Fahrzeuges nicht zu gefährden, musste in einem ersten Schritt eine Basis-Version einer digitalen Karte des Depots erstellt werden.



Im zweiten Schritt wurde diese digitale Karte um den Layer "Points of Interest" (PoI bzw. äquivalent „Landmarken“) erweitert, um die kritische Aufgabe der Lokalisierung der Strassenbahn zu unterstützen.

Für dieses Karten-Layer „PoI“ wurden Sensordaten von beispielhaften PoIs aufgenommen und die aufgenommenen Sensordaten der PoIs annotiert. Damit wurde schließlich ein KI-Modell zur automatisierten Erkennung dieser PoIs trainiert und ein Verfahren für dessen Geo-Lokalisierung entwickelt, um die definierten PoIs zuverlässig als solche zu detektieren und ausreichend genau zu positionieren.

Die Ergebnisse einer ersten Iteration wurden bezüglich des Objektdetektors und der Positionierungsgenauigkeit der PoIs validiert und entsprechende Optimierungspotentiale der Trainingsdaten-Annotation und des Trainings-Modells zur automatisierten Objekterkennung identifiziert. Nach deren Umsetzung in einer zweiten Iteration wurde die Wirksamkeit der Optimierungsmaßnahmen analysiert.

Im Folgenden werden die Arbeitsergebnisse detailliert.

### *Darstellung der Ergebnisse*

#### Schritt 1 – Basis-Version der digitalen Karte

Die Basis-Version der digitalen Karte wurde mit den minimalen Anforderungen an den autonomen Betrieb für die festgelegten Szenarien und Strecken im Depot realisiert und damit der entsprechende Meilenstein „Basisfunktionalität der statischen, digitalen Karte“ erreicht. Diese Kartenversion baute auf der Technologie und den Funktionalitäten der im AST-Projekt genutzten digitalen Karte mit georeferenzierten Gleistopologien auf und wurde um 2D-Rasterkarten der Umgebung erweitert, womit eine Lidar-basierte Lokalisierung in Gebäuden grundsätzlich realisiert werden konnte.

#### Schritt 2 – Karten-Layer "Points of Interest" (PoI)

Um das Karten-Layer PoI zu entwickeln, wurden Sensorinformationen der Kameras und Laserscanner (Lidare) des AST-Sensor-Sets aufgenommen und diese dann für den weiteren Prozess verwendet. Um diese Daten effektiv fusionieren zu können, benötigt es eine 3D Rekonstruktion der Laserscans und eine Kalibrierung der Sensoren.

Die Detektion der PoI wird durch KI-Detektion in den Kamera-Bildern gelöst. Flaschenhals für KI-Detektoren ist üblicherweise die Existenz von annotierten Daten. Dies benötigt zunächst eine geeignete „Datenaufbereitung“. Um diese zu verbessern, wurde ein systematischer Ansatz „Aktives Lernen“ entwickelt. Hier wird iterativ halbautomatisch und skalierbar die PoI in den Daten zu annotiert. Hierzu wurde ein „Aktives Lernen“ Zyklus entwickelt. Als PoI wurden die Kategorien „ROAD\_Verkehrsbake“ und „ROAD\_Schrankenzaun“ (siehe Abbildung 27) ausgesucht, da sie im Depotkontext breit zu beobachten waren.

Um eine rekonstruierte Punktwolke zu erhalten, bedarf es den Schritt der „3D Rekonstruktion“, welcher mehrere Laserscans miteinander registriert und kombiniert.

Für eine verbesserte, genaue 3D Verortung der 2D KI-Detektionen werden die Daten aus Kamera und rekonstruierter Punktwolke in der „2D-3D Fusion“ miteinander kombiniert, um schliesslich die Schritte „Detektion und Lokalisierung“ bzw. „Georeferenzierung“ zu lösen.

Die Unterarbeiten betreffen insofern die Schritte: 1. Daten und KI-Training; 2. 3D Lokalisierung und Erstellung des Karten-Layers PoI., entsprechend der beiden Meilensteine: „Verfügbarkeit kalibrierter Daten und notwendiger Annotierungen“ sowie „Verbesserte POI Erkennungs- und Positionierungsgenauigkeit durch optimierte Sensorfusionsmethoden“.

#### *Datenaufbereitung, Datenannotation und Training für die Objekterkennung*

Die für die Objekterkennung erforderlichen Daten werden aus Bag-Dateien eines ROS Systems extrahiert. Die Daten beinhalten Video-Streams und Laser-Scans. Es werden Bilder extrahiert und anschließend im bestehenden Annotationstool annotiert. Auf den Bildern werden Begrenzungsrahmen (Bounding Box) für die beiden Kategorien ROAD\_Verkehrsbake und ROAD\_Schrankenzaun gelabelt. Abbildung 27 zeigt ein Beispiel aus der Datenbank „ai.store“ der Kamerabilder (link) und annotierte „Bounding Boxes“ der Kategorien ROAD\_Verkehrsbake und ROAD\_Schrankenzaun.

Eine Bounding Box beschreibt die Lage, Ausdehnung sowie Klasse eines Objekts. Der Name Bounding Box leitet sich daraus ab, dass diese als rechteckige (meist farbige) Boxen visualisiert werden. Innerhalb eines

Bildes muss die Angabe bzw. das Labeln von allen (definierten) Objekten inklusive zugehöriger Klasse erfolgen. Im Rahmen dieser Validierung existieren zwei Klassen; jeweils eine für Schranken­zäune und eine für Verkehrsbar­ken.

Mit Hilfe der annotierten Daten wurde ein KI-Objektdetektor für diese beiden Kategorien trainiert. Die Auswertung der trainierten Modelle wird dann im Anschluss durchgeführt. Somit ist Rohdatenaufbereitung abgeschlossen und es sind Trainingsdaten für die KI zur Objekterkennung verfügbar.



Abbildung 27: Ausschnitt aus der Datenbank „ai.store“ Links Beispiel eines Video-Streams. Rechts annotierte “Bounding Boxes” der beiden Kategorien ROAD\_Verkehrsbake, und ROAD\_Schranken­zaun.

#### Automatisierte Erstellung des Karten-Layers PoI

Um die PoI in der Karte automatisiert zu verorten, wird eine Sensorfusion von Bild- und Lidardaten verfolgt. Das Sensorsystem stellt bereits kalibrierte Kamera- und Lidar-Daten zur Verfügung. Die 3D-Rekonstruktion wird mit einem SLAM-Algorithmus implementiert. Die rekonstruierte Punktwolke wird anschließend georeferenziert. POIs werden dann mit Hilfe eines KI-trainierten Objekterkennungsmodells erkannt, um eine digitale Karte zu erstellen.

#### 3D Rekonstruktion

Eine 3D- Rekonstruktion wird aus gegebenen Punktwolken-Sensordaten erstellt. Ein SLAM-basierter Ansatz wurde implementiert, um eine 3D-Punktwolke für das AStriD-Depot zu extrahieren, wie in der folgenden Abbildung 28 dargestellt.

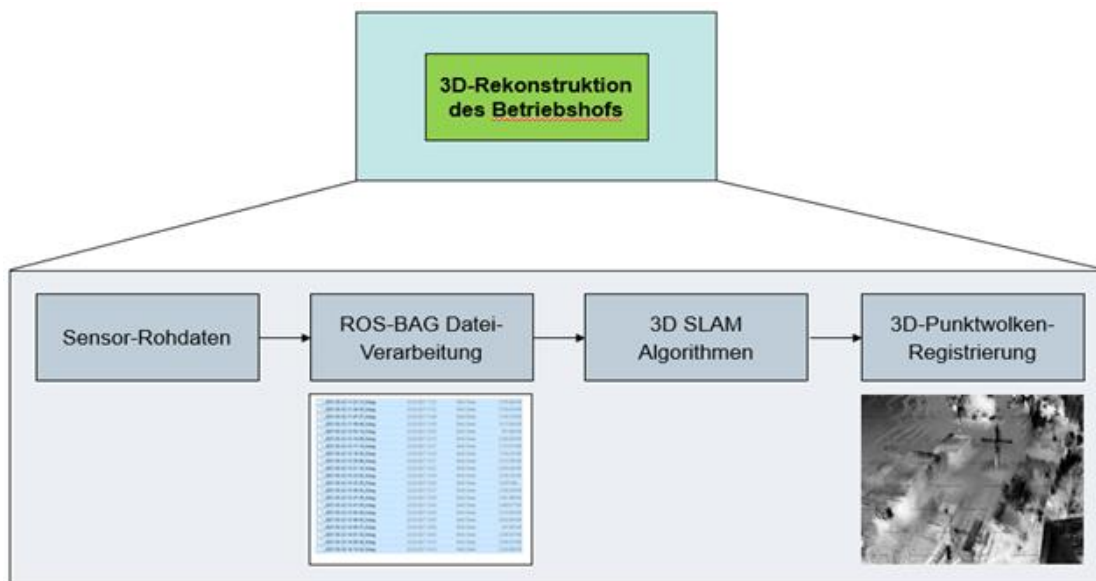
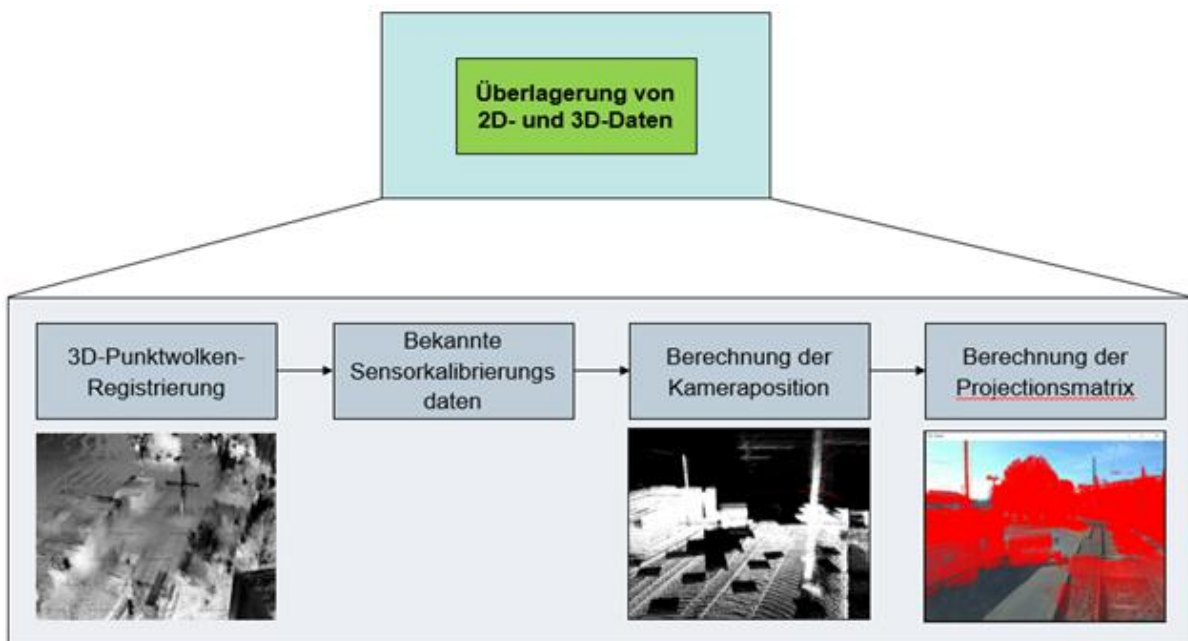


Abbildung 28: Verfahren zur 3D-Rekonstruktion: Verfahren zur Erzeugung von 3D-Punktwolken­daten.

## 2D-3D Sensorfusion

Das folgende Diagramm (Abbildung 29) zeigt den 2D-3D-Sensor-Fusions Algorithmus. Zunächst werden die 3D Punktwolkendaten registriert. Anschließend werden die Sensorkalibrierungsdaten extrahiert. Die Kamerapositionen der verschiedenen an der Sensoreinheit montierten Kameras werden geschätzt. Bei gegebenen intrinsischen und extrinsischen Kameraparametern können alle sichtbaren Punkte in jeder Kamera auf das jeweilige Kamerakoordinatensystem projiziert werden. Die Kamerapositionen und die rekonstruierte 3D-Punktwolke werden dann in dasselbe Koordinatensystem übertragen. In Abbildung 29 sind die Lidar-Punkte auf dem Kamerabild rot gekennzeichnet. Dieser Schritt ist für die genaue Lokalisierung von Objekten von großer Bedeutung. Die Leistung der 2D-3D-Sensorfusion hängt davon ab, wie genau die Sensorkalibrierung durchgeführt wurde. Daher führt ein kleiner Fehler in der Sensorkalibrierung zu einem erheblichen Fehler in der Lokalisierung.



**Abbildung 29: 2D-3D-Sensorfusion: Überblick über die Sensorfusion zwischen 3D-Punktwolke und Kamerabildern**

## Objekterkennung und -lokalisierung

Die Objekterkennung erfolgt auf der Grundlage der im Abschnitt Datenaufbereitung erläuterten Bounding-box-basierten kommentierten Daten. Das Modell wird trainiert und zur Erkennung von Objekten auf den Kamerabildern verwendet. Die Objekterkennung erfolgt mit Hilfe eines trainierten Modells für 2 Objektklassen, um die beiden oben genannten Objekte in dem gegebenen Bild zu erkennen (siehe Abbildung 30). Eine 2D-3D-Sensorfusion, die im vorherigen Schritt durchgeführt wurde, liefert Korrespondenzen zwischen Lidar-Punkten und Pixeln. Wir berechnen die Punkte, die zu dem Objekt gehören, indem wir nur die Punkte auswählen, die innerhalb der erkannten Bounding Box liegen. Mit dem DBSCAN-Algorithmus<sup>9</sup> werden zunächst alle Hintergrundpunkte entfernt, die innerhalb des Begrenzungsrahmens liegen. So entsteht ein einziger 3D-POI im lokalen Koordinatensystem. POIs kommen in mehreren Kamerabildern vor, was bedeutet, dass das Objekterkennungsmodell denselben POI in mehreren Bildern erkennen kann. Dadurch verringert sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Objekt fälschlicherweise nicht erkannt wird. Darüber hinaus wird die 3D-Lokalisierung eines POI durch das Clustern mehrerer Objektmessungen in mehreren Bildern verbessert. Ein einzelner POI aus mehreren Messungen wird aus verschiedenen Bildern abgeleitet, indem die nächstgelegenen Punkte gemittelt und Ausreißer entfernt werden.

<sup>9</sup> Schubert, E., Sander, J., Ester, M., Kriegel, H.P. and Xu, X., 2017. DBSCAN revisited, revisited: why and how you should (still) use DBSCAN. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 42(3), pp.1-21.



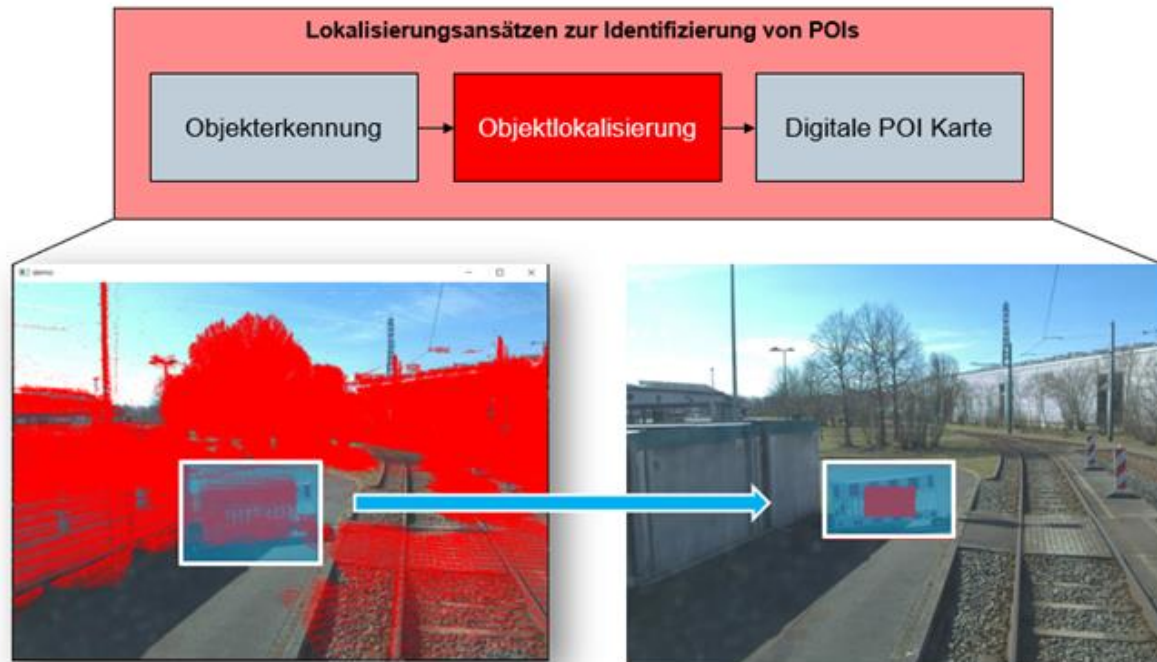


Abbildung 30: Objekterkennung mit 2D-3D-Sensorfusion. Bei gegebenen Boundingboxen aus der Objekterkennung erfolgt die Objektlokalisierung durch Schätzung von Punkten innerhalb der Boundingbox durch Projektion von Lidarpunkten auf das Bild.

Georeferenzierung:

Um eine Karte von POIs zu erstellen, wird die Transformation zwischen dem lokalen Koordinatensystem und dem geodätischen Koordinatensystem benötigt. Diese Transformation wird durch Georeferenzierung berechnet. Das Ziel dieses Schritts ist die Georeferenzierung der rekonstruierten Punktwolke, um die korrekte 3D-Kartenposition des POI zu ermitteln. Das Konzept der Georeferenzierung ist in Abbildung 31 dargestellt.

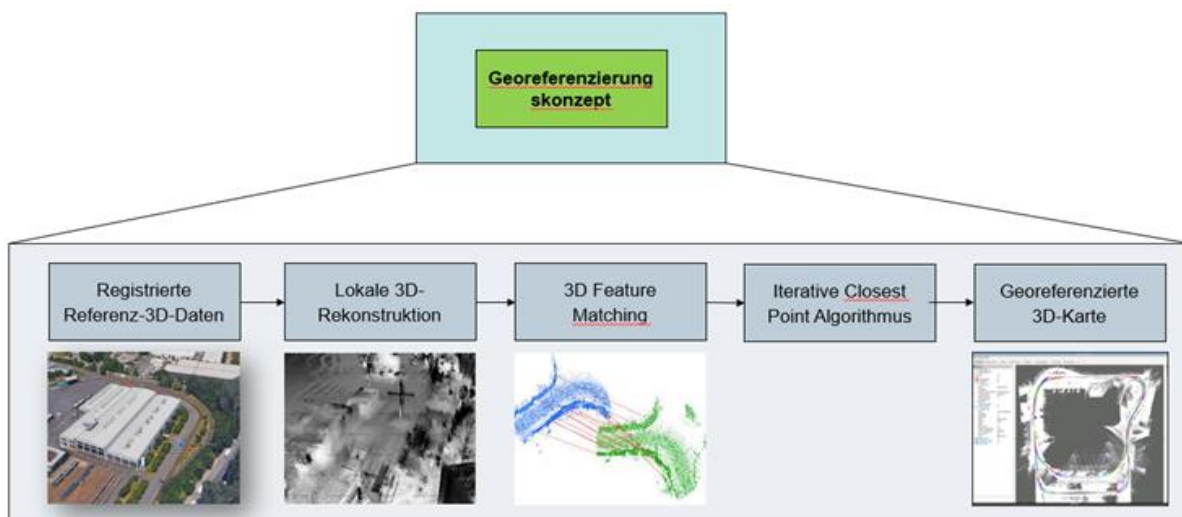


Abbildung 31: Georeferenzierung Konzept.

Für die Punktwolkenregistrierung konnte eine bestehende 3D Punktwolke von Google Earth verwenden. Die Registrierung zwischen der rekonstruierten LIDAR-Punktwolke und der Google Earth-Punktwolke wurde

über eine 3D-Merkmalzuordnung durchgeführt, gefolgt von einem iterativen Algorithmus für den nächstgelegenen Punkt (ICP = iterative closest point)<sup>10</sup>. Die Transformation zwischen diesen beiden Punktwolken liefert die geodätische Transformation. Die 3D Punktwolken in diesem Konzept wurden für Forschungszwecke verwendet. Für eine weitergehende Entwicklung werden in Zukunft hochwertigere kommerzielle georeferenzierte 3D-Daten notwendig. Die Punktwolkenregistrierung und die Qualität der Google 3D Punktwolke können bei diesem Schritt zu Fehlern von bis zu 1m führen. Die daraus resultierende Karte ist in Abbildung 32 zu sehen. Dort sind die detektierten POIs auf der Karte und die dazugehörigen Kamerabilder aus der Sensorreihe zu sehen.



Abbildung 32: Erstellte Karte mit den jeweiligen Bildern der erkannten Objekte.

#### Methodenverbesserung "Aktives Lernen" für KI-basierte Sensorfusion

Für die Objekterkennung wurde eine Pipeline für aktives Lernen implementiert, um das KI-Modell für die POI-Erkennung zu verbessern. Die Pipeline für aktives Lernen wird in der folgenden Abbildung 32 beschrieben. Zu den Zielen der aktiven Lernpipeline gehören:

- Iterative Bewertung der KI-Detektor Performanz auf neuen Datensätzen
- Iterative Generierung von durch Menschen validierte Annotationen
- Verfolgung des gesamten Vorgangs zur Überwachung des Fortschritts

Das Modell wird iterativ trainiert und verbessert, indem neue Daten abgerufen werden. Die Ergebnisse jeder Iteration werden von Menschen validiert. Das evaluierte Modell wird dann verwendet, um Anmerkungen für jede Iteration zu generieren.

<sup>10</sup> Segal, A., Haehnel, D. and Thrun, S., 2009, June. Generalized-icp. In Robotics: science and systems (Vol. 2, No. 4, p. 435).

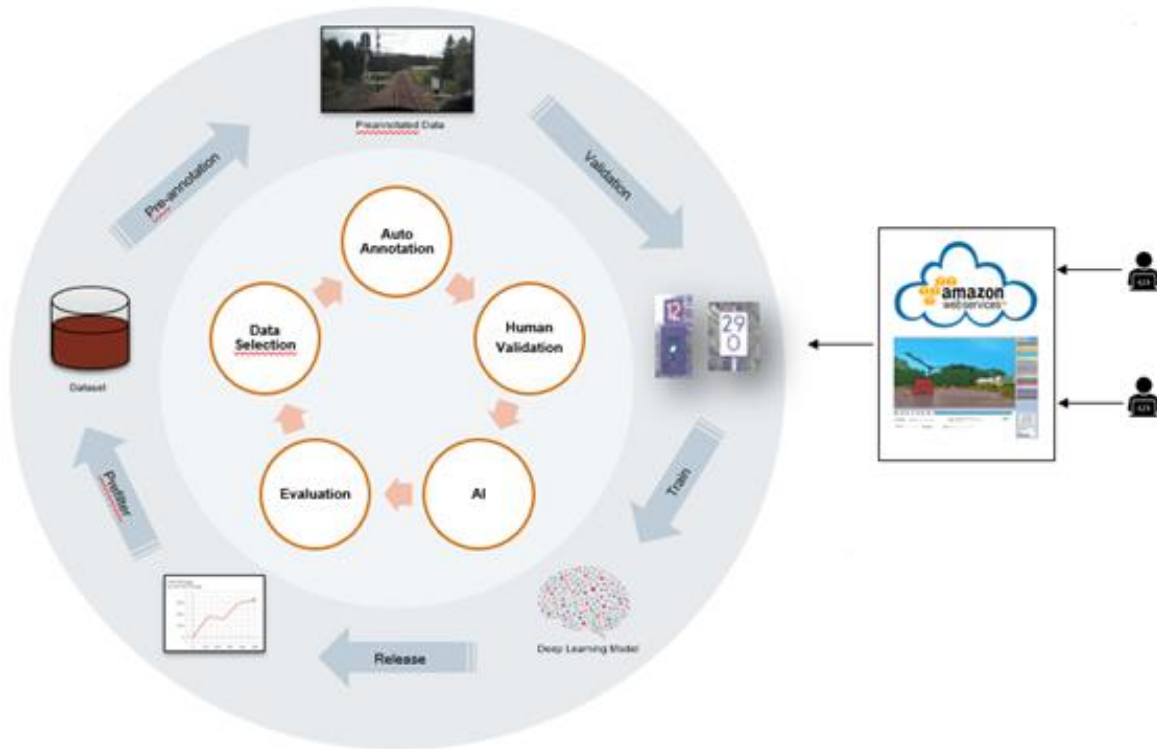


Abbildung 33: Pipeline für aktives Lernen

### Validierung

Konzeptweise sieht die Validierung einen 2-stufigen Prozess, und somit eine zweistufige Optimierung, vor. Auf diese Weise erfolgte die Validierung des Objektdetektors sowie der Positionierungsgenauigkeit der POIs auf unterschiedlichen Datensätzen. Dies hat den Vorteil, dass der Einfluss der Optimierung objektiviert und im Rahmen der zweiten Stufe miteinbezogen werden kann. Insgesamt ist somit ein Datensatz, bestehend aus 7.603 Bildern, wovon 2.496 mindestens ein zu labelendes Objekt beinhalteten, entstanden. Zur Bewertung der Güte des Objektdetektors kamen hierbei die Fehlermetriken Accuracy sowie Intersection over Union (IoU) zum Einsatz.

$$IoU = \frac{\text{Area of Overlap}}{\text{Area of Union}}$$

Abbildung 34: Schematische Darstellung der Berechnung des IoU.

Die Accuracy gibt die Anzahl der Bilder mit korrekt ermittelter Bounding Box an, wobei entweder die Anzahl an Boxen oder deren Klasse als Abgleichkriterium eingesetzt wird. Der IoU gibt im Bereich von 0 bis 1 das Maß an Überlappung von der detektierten Box im Bezug auf das zugehörige Label (s. Abbildung 34), an. Im Rahmen der Gütebewertung wird mittels Vergleiches mit einem definierten Schwellwert eine Detektionsentscheidung angenommen oder abgelehnt. Verbreitete Schwellwerte sind bspw. 0,5, 0,75 und 0,9. Im Kontext der vorgenommenen Analysen kam ein Schwellwert von 0,75 zum Einsatz.

Im Rahmen der ersten Validierung führte dies zu insgesamt 31,68% fehlerhaften Messungen. Die Verteilung entsprechend der genannten Metriken ist in Tabelle 15 dargestellt. Die Analyse der fehlerhaften Prognosen zeigte eine Disharmonie bez. der Labels seitens des Trainings und der Validierung, was mittels Vereinheitlichung zu einer Verbesserung der Messleistung führen sollte. Außerdem sollte, mittels Erhöhung der Menge an Trainingsbeispielen, als auch durch die Betrachtung des Model-Thresholds, welcher einen Schwellwert auf die Prognose-Konfidenz des Objektdetektors darstellt, die Menge an False Negatives („zu viele Boxen detektiert“) reduzierbar sein.

**Tabelle 15: Verteilung über den Fehler des Objektdetektors im Rahmen der ersten Iteration der Validierung.**

Metrik	Fehlerart	Vorkommen
Accuracy	Zu viele Bounding Boxen	164
Accuracy	Zu wenige Bounding Boxen	1.091
Accuracy	Falsche Klasse von mind. einer Bounding Box	25
IoU	IoU-Abgleich negativ	1.129

Im Rahmen der zweiten Iteration der Validierung des Objektdetektors wurde der IoU-Schwellwert als ein zu evaluierender Parameter angenommen, um eine möglichst vollständige Repräsentation der Umwelt zu erstellen, statt den Fokus auf eine pixelgenaue Detektion zu legen. Auf diese Weise kann ein gewisser Grad an Rauschen, d.h. leichte Abweichungen der detektierten Boxen von den Labels, erlaubt werden. Das Ergebnis dieser Evaluation war ein IoU von 0,35. Entsprechend gängiger Literatur und Praxis sollen die Datensätze zur Evaluation von Parametern und zur Ermittlung der Messgüte disjunkt sein, jedoch kann der IoU-Schwellwert im Bereich von 0 bis 0,5 beliebig gewählt werden, ohne die Messleistung signifikant zu beeinflussen. Insgesamt führte dies zu 31,59% fehlerhaften Messungen und somit einer Verbesserung um 0,09%. Die Verteilung der fehlerhaften Messungen auf die genannten Fehlerkategorien ist in 16 dargestellt. Als Fehlerquellen wurden ausgemacht:

- Disharmonie der Trainings- mit den Validierungslabeln. Aufgrund der Verwendung eines geringen IoU-Thresholds wirkt sich dies jedoch nicht auf die Accuracy aus.
- Mehrere Objekte nebeneinander werden als ein Objekt wahrgenommen
- Teilweise verdeckte Objekte werden entweder nicht oder, abhängig von der Objektgröße (und nicht der eigentlichen Klasse) als Verkehrsbarke oder Schrankenzaun, wahrgenommen und
- Weiter entfernte Objekte werden nicht detektiert.

**Tabelle 16: Verteilung über die Anzahl an fehlerhaften Messungen nach Kategorie im Rahmen der zweiten Validierungsiteration des Objektdetektors.**

Metrik	Fehlerart	Vorkommen
Accuracy	Zu viele Bounding Boxen	1
Accuracy	Zu wenige Bounding Boxen	2.400
Accuracy	Falsche Klasse von mind. einer Bound Box	1
IoU	IoU-Abgleich negativ	0

Sämtliche Fehlerquellen lassen sich durch entsprechende Trainingsdaten, inklusive einer wahrscheinlich notwendigen, längeren Trainingsdauer, adressieren. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass im Falle einer Detektion diese zumeist als korrekt, aber verwechselt angenommen werden kann.

Im Rahmen der Validierung der Positionierung der POIs erfolgte die Definition von zwei Szenarien. Pro Szenario existierten zwei explizite Aufbauten bestehend aus Verkehrsbarken und/ oder Schrankenäune, welche in Tabelle 17 aufgelistet sind.

Tabelle 17: Definition der Aufbauten hinsichtlich der Szenarien 1 sowie 2 im Rahmen der Validierung der Positionierung der POIs.

Szenario	Aufbau	Beschreibung
1	1	Vier Verkehrsbarken nebeneinander im 90° Winkel zur Strecke
1	2	Drei Verkehrsbarken hintereinander im 45° Winkel zur Strecke
2	1	Vier Schrankenzäune im Quadrat angeordnet
2	2	Ein Schrankenzaun im 30° Winkel zur Strecke, mit einer Verkehrsbarke davor

Im Anschluss an das Labeln der Daten für die POI musste eine Koordinatentransformation erfolgen, sodass die Messergebnisse sowie die Labels die gleiche Basis besitzen und folglich miteinander verglichen werden können. Als Fehlermetriken kamen hierbei die Anzahl an nicht bzw. falsch erkannter POI sowie der euklidische Abstand zum Einsatz. Ersteres gibt an, wie viele der erwarteten POI entweder nicht vorhanden sind oder der falsche Klasse zugewiesen wurden. Zweiteres gibt die Distanz zwischen dem Label und dem Messwert in Meter an.

Die Auswertungsergebnisse nach Szenario, Aufbau und Iteration sind in Tabelle 18 dargestellt. Als Fehlermetriken kamen hierbei zum Einsatz:

- Durchschnittlicher Abstand in m, über alle POI: Der durchschnittliche Abstand zwischen den gemessenen und gelabelten POIs in Meter.
- Durchschnittlicher Abstand in m, Bereinigt: Äquivalent zum vorherigen Fall, wobei der Fehler nur über POIs ermittelt wird, die in allen Messiteration detektiert wurden.
- Anzahl POI, nicht erkannt: Absolute Anzahl nicht detektierter POIs.
- Anzahl POI, falsche Klasse: Anzahl an POIs, die detektiert wurden, aber die falsche Klasse zugeordnet wurde.

Zusätzlich ist in Tabelle 19 die Veränderung der Kennzahlen zwischen den beiden Iterationen dargestellt. Hieraus geht hervor, dass in drei von vier Fällen der bereinigte Abstand und somit der Fehler, verringert wurde. Ebenso verbessert hat sich die Anzahl an nicht erkannten sowie falsch klassifizierten POI.

Tabelle 18: Ergebnisse der Validierung des Objektdetektors nach Iteration, Szenario sowie Aufbau entsprechend der definierten Metriken.

Szenario	Aufbau	Iteration	Durchschnittlicher Abstand in m		Anzahl POI	
			Über alle POI	Bereinigt	Nicht erkannt	Falsche Klasse
1	1	1	2,65	2,65	5	0
1	1	2	2,82	2,86	4	0
1	2	1	1,82	1,82	0	0
1	2	2	1,79	1,79	0	0
2	1	1	2,19	2,19	2	1
2	1	2	2,16	2,13	1	0
2	2	1	3,42	3,42	1	1
2	2	2	3,90	3,32	0	0



Tabelle 19: Relative Änderung der Bewertung mittels Metriken im Rahmen der Validierung des Objektdetektors aufgeschlüsselt nach Iteration sowie Aufbau.

Szenario	Aufbau	Änderung durchschnittlicher Abstand in %		Änderung POI in %	
		Über alle POI	Bereinigt	Nicht erkannt	Falsche Klasse
1	1	+6,40	+7,90	-20	0
1	2	-1,64	-1,64	0	0
2	1	-1,36	-2,73	-50	-100
2	2	+14,03	-3,92	-100	-100

Im Rahmen einer abschließenden Prüfung auf systematische Fehler konnten jedoch keine solchen identifiziert werden. Abbildung 35 zeigt die Prüfung auf systematische Fehler. Verdeutlicht ist der sich ergebende Fehlervektor, für jeden detektierten POI inklusive zugehörigem Label. Aus dem Betrag (d.h. der Länge) sowie der Richtung der Vektoren folgt, dass keine systematischen Fehler vorliegen.

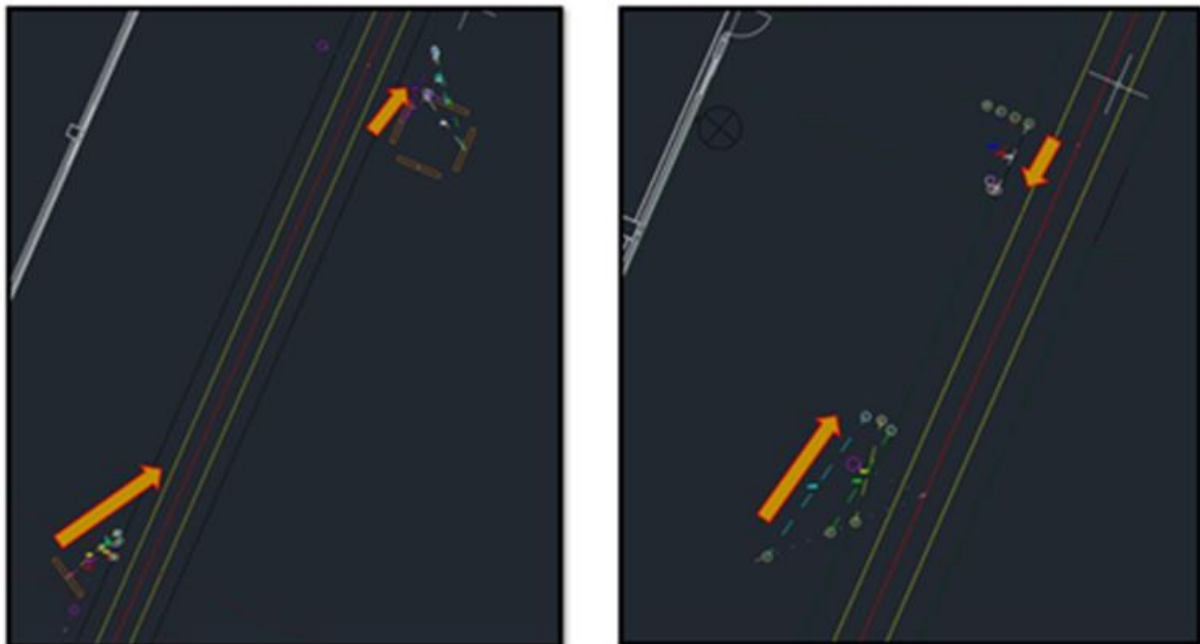


Abbildung 35: Darstellung der Fehlervektoren (orange Pfeile) der Iterationen 1 (rechts) sowie 2 (links) der Validierung der POIs.

#### Integration/Produktion/Dissemination

Die erstellte Karte in Form von Shape-Dateien wurde in die mCloud hochgeladen. Diese Shape-Dateien enthalten die Koordinaten von POIs und zugehörige Metadaten. Zur Integration der Karte werden die Shape-Dateien bereitgestellt und vom Data Hub abgerufen.

#### Diskussion und zukünftige Arbeit

Es wurde eine End-to-End-Pipeline implementiert, um 3D-Landmarken aus Bild- und Lidar-Daten zu erzeugen. Außerdem wurde ein Prozess zur Georeferenzierung implementiert, um die geodätische Transformation zu schätzen. Obwohl die entwickelten Methoden für den Demonstrator im Depot der ViP sehr gute Ergebnisse liefern, gibt es bestimmte Fehlerquellen, die für eine skalierbare Lösung adressiert werden müssen:

- **Ungenau Kalibrierung:** Die implementierte Lösung beruht auf einer genauen Kamera- (intrinsisch und extrinsisch) und LIDAR-Kalibrierung, die zur Projektion von Lidar-Punkten auf das Bild zur Objektlokalisierung verwendet wird. Dies hat einen großen Einfluss auf die resultierende Genauigkeit der Methode. Abbildung 36 (rechts) zeigt verschobene LIDAR-Punkte, die zu Fehlern bei der Lokalisierung führen können.

- **Georeferenzierung:** Die implementierte Georeferenzierungsmethode basiert auf Google 3D-Punktwolken für Forschungszwecke und der entsprechenden geodätischen Transformation. Die Qualität der georeferenzierten Google-Punktwolken beträgt bis zu 1 m. Für die zukünftige Entwicklung braucht es die Implementierung einer hochgenauen Georeferenzierung, entweder mit Hilfe von Markern vor Ort oder mit Hilfe einer qualitativ hochwertigeren, georeferenzierten Punktwolke für die Punktwolkenregistrierung, z.B. mit Messsystemen wie Trimble MX9.
- **Verdeckungen:** Der derzeitige Ansatz liefert möglicherweise nicht die optimalen Ergebnisse für verdeckte, unübersichtliche Bereiche, wie in Abbildung 36 (links) gezeigt. Die Methode zur Objektlokalisierung ist nicht effektiv, wenn Objekte von hinten zu sehen sind und die Sicht behindern, obwohl das Objekterkennungsmodell solche Objekte im Bild vorhersagen kann.

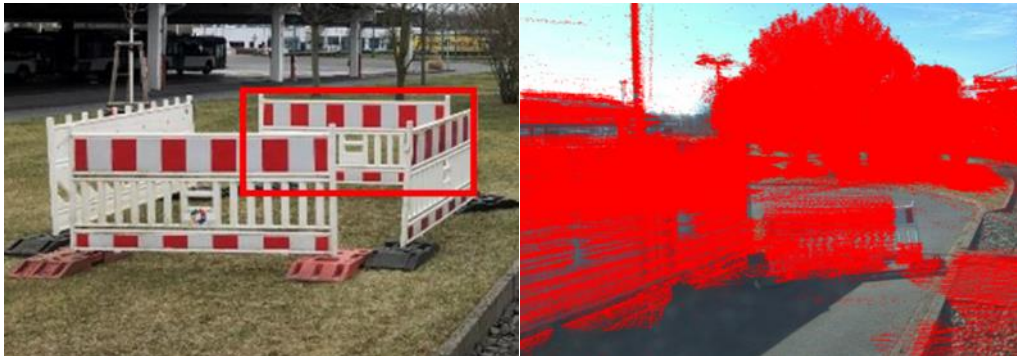


Abbildung 36: Beispiel für Verdeckungen oder verdeckte Objekte (rote Bounding Box) sowie auf das Bild projizierte Lidar-Punkte (rechts).

### Sicherheitskonzept mit sicherem Remote Not-Aus

Das Ziel, die Straßenbahn ohne jegliches Personal an Bord autonom fahren zu lassen, bedeutete die Verlagerung des Fahrers/Sicherheits-Supervisors aus dem Fahrerstand in die AStriD-Leitstelle als sogenannten „AStriD-Supervisor“. Dennoch musste für den Fall des Eintretens einer Notsituation ein Stoppen der Straßenbahn sichergestellt werden. Dafür wurde ein 2-stufiger „Not-Aus“ konzipiert, der mit Hilfe einer SIL3-zertifizierten Funkfernsteuerung ausgelöst wird. Da sich der AStriD-Supervisor in der AStriD-Leitstelle befindet, ist es ihm nicht möglich die Fahrstrecke der autonom fahrenden Straßenbahn stetig einzusehen. Aus diesem Grund wurde eine Livebildübertragung von Fahrzeug auf die Landseite umgesetzt, um diesen Betriebsablauf zu unterstützen. Hieraus ergeben sich folgende Aspekte, die für den sicheren Demonstrationsbetrieb relevant sind:

1. Sichtfeld & Fahrzeugzustand: Reproduzierung in „Echtzeit“ in der AStriD-Leitstelle. Die Sicherheitsstrategie für die Anzeige in der AStriD-Leitstelle legt den Fokus auf die Ausfalloffenbarung und nicht auf die korrekte Funktion (keine SIL-Einstufung, keine sichere Kommunikation). Mangelhafte Qualität der Bildübertragung, eingefrorenes Bild oder Komplettausfall müssen vom AStriD-Supervisor erkannt werden können.
2. Wahrnehmung der Beschleunigung/Verzögerung des Fahrzeugs: Der AStriD-Supervisor kann über ein akustisches Signal Beschleunigung/Verzögerung wahrnehmen. Das kann als Backup/Unterstützung zum Punkt 1) gesehen werden (keine SIL-Einstufung).
3. Eingriff des Fahrers, Sicherheitsbremsung: Der AStriD-Supervisor kann bei Bedarf die Sicherheitsbremse am Fahrzeug drahtlos auslösen (SIL-Einstufung)

Die folgende Abbildung stellt einen vereinfachten Überblick der integrierten Systeme und deren Komponenten dar.



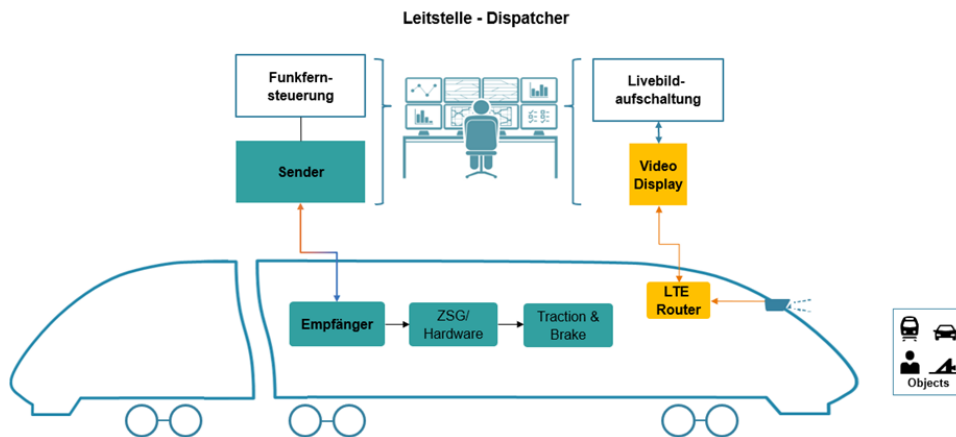


Abbildung 37: Systemarchitektur Funkfernsteuerung und Livebildaufschaltung.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass es sich um zwei voneinander unabhängige Systeme handelt. Wobei die Funkfernsteuerung ohne die Betriebsbereitschaft der Livebildaufschaltung nicht von der AStriD-Leitstelle aus genutzt werden darf. Eine detaillierte Beschreibung dieser zwei Systeme befindet sich in den folgenden Kapiteln.

### Livebildaufschaltung

#### Funktionsweise

Damit eine Kontrolle der Fahrt durch den AStriD-Supervisor in der AStriD-Leitstelle erfolgen kann, wird eine Kamera im Fahrzeug installiert, die das Sichtfeld des Fahrers abbildet. Da der Ausfall einer Kamera einen betriebshemmenden Zustand verursacht, wird diese redundant ausgeführt. Ist die Kamera defekt erfolgt die Umschaltung auf die IP-Adresse der zweiten Kamera manuell durch den Bediener. Die Integration der Kameras im Fahrzeug ist in Abbildung 38 dargestellt.



Abbildung 38: Position der Kameras im Fahrerstand

Die PoE-Innenkameras werden an einem Switch angeschlossen. Von dort aus werden die Livebilder über einen Router an die AStriD-Leitstelle gesendet. Diese Bilder werden dem AStriD-Supervisor auf einem Bildschirm über den Webbrowser und einer Nutzeroberfläche angezeigt. In Abbildung 39 ist das Sichtfeld der Livebildkamera für den AStriD-Supervisor in der AStriD-Leitstelle dargestellt.



Abbildung 39: Aufschaltung des Sichtfeldes der Livebildkamera.

In Abbildung 40 ist die Systemarchitektur der Livebildübertragung dargestellt. Da es sich um eine Livebild-  
datenübertragung handelt, mit Hilfe dessen der AStriD-Supervisor eine Notsituation erkennen muss, darf das  
Gesamtsystem nur eine geringe Latenz aufweisen. Dies wird durch Nutzung einer einfachen Architektur un-  
ter Berücksichtigung der Konfigurationen der Einzelkomponenten umgesetzt und in einem entsprechenden  
Feldversuch untersucht.

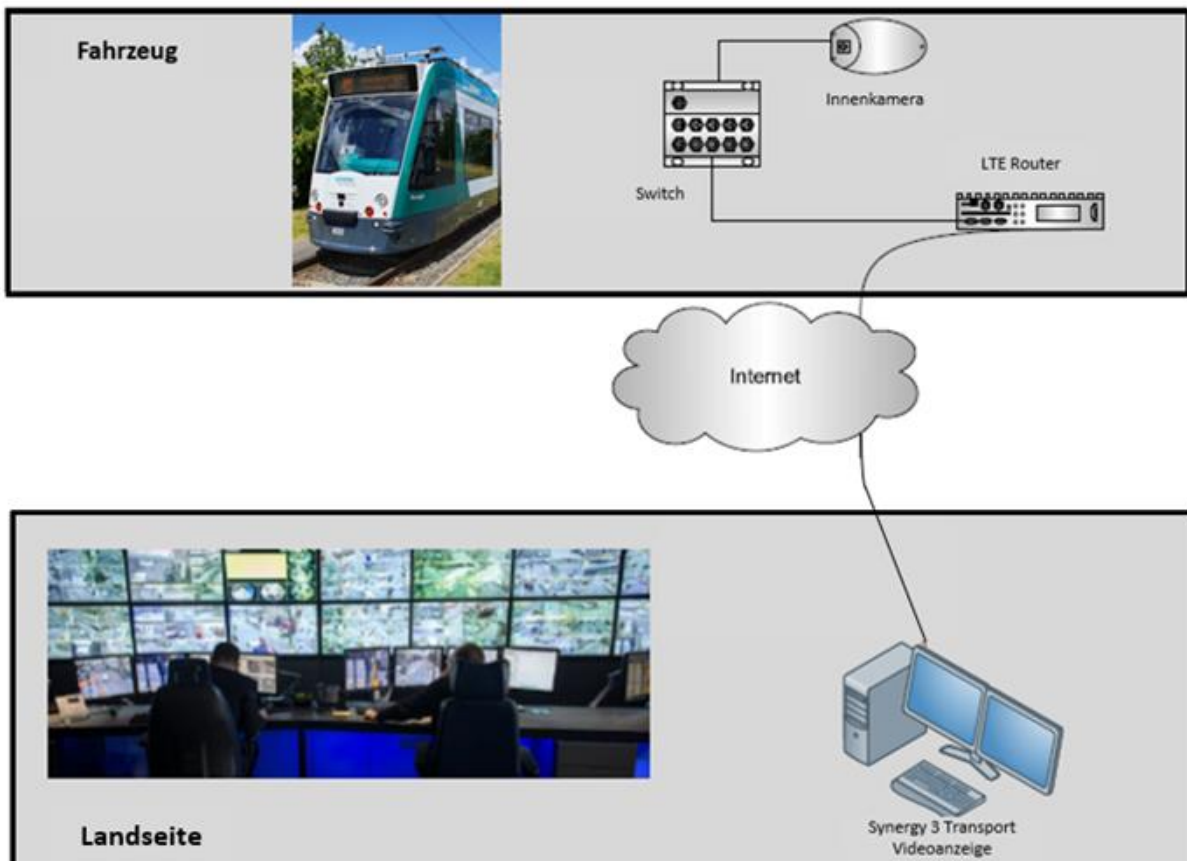


Abbildung 40: Systemarchitektur der Livebildübertragung.

Da die Livebilddatenübertragung digital erfolgt, musste sichergestellt werden, dass kein eingefrorenes Bild angezeigt wird. Hierfür ist das Videosystem, das aus Kamera, Switch und landseitigen Webbrowser besteht, selbstständig in der Lage, zu erkennen ob ein Stream geliefert wird oder nicht. Wird kein Stream geliefert erscheint auf dem Bildschirm ein blauer Rahmen in welchem „Video stopped“ dargestellt ist. Zusätzlich dazu kann über das Standbild der Lebendsignale (Uhrzeit und Datenübertragungsrate) ein eingefrorenes Bild festgestellt werden. Somit kann der AStriD-Supervisor klar erkennen, dass die Livebildübertragung gestört ist.

### Latenz

Das vorgeschlagene System muss eine möglichst geringe Latenzzeit besitzen, um eine zeitnahe Handlung des AStriD-Supervisors in einer Notsituation gewährleisten zu können. Hierfür wurden Testmessungen im Betriebshof der ViP auf der realen Strecke mit verschiedenen Parametersätzen durchgeführt.

Die Latenzzeiten befinden sich demnach unterhalb von 500 Millisekunden und damit im akzeptablen Bereich. Lediglich 2 Messwerte ergaben eine inakzeptable Latenzzeit von ~1,2 Sekunden, welche bei der Einfahrt in die Abstellhalle aufgenommen wurden. Die Auswertung der Daten ergab folgende Übersicht:

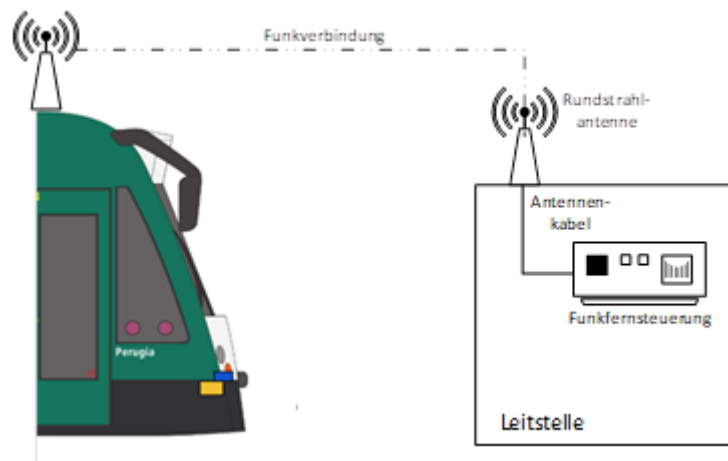
- Median: 396 Millisekunden
- Mittelwert: 399 Millisekunden
- Spitzenwert: 1.270 Millisekunden
- Minimalwert: 274 Millisekunden

### Funkfernsteuerung

#### Funktionsweise

Die Funkfernsteuerung realisiert einen Fernzugriff auf das Fahrzeug zur Ausführung eines 2-stufigen Not Aus. Hierfür wird ein landseitiger Sender eingesetzt. Dieser befindet sich in der AStriD-Leitstelle und ist über ein Antennenkabel mit der Rundstrahlantenne auf dem Dach der AStriD-Leitstelle verbunden. Über diese Antenne und der fahrzeugseitigen Antenne wird die Funkverbindung zum fahrzeugseitigen Empfänger aufgebaut. Die fahrzeugseitigen Antennen sind in doppelter Ausführung integriert, um die Empfangsdiversität zu erzielen und eventuell auftretende Funklöcher zu überbrücken.

Die prinzipielle Funktionsweise ist in Abbildung 41 dargestellt.



**Abbildung 41: Datenkommunikation Leitstelle – Fahrzeug.**

Der Fernzugriff auf das Fahrzeug genügt dem Sicherheitslevel SIL 3 (nach den DIN-üblichen Safety-Normen für Schienenfahrzeuge für Hardware und Software), die Totmannfunktion dem SIL 2. Die mit SIL auszuführenden Funktionen sind in der Abbildung 42 dargestellt und entsprechend gekennzeichnet.

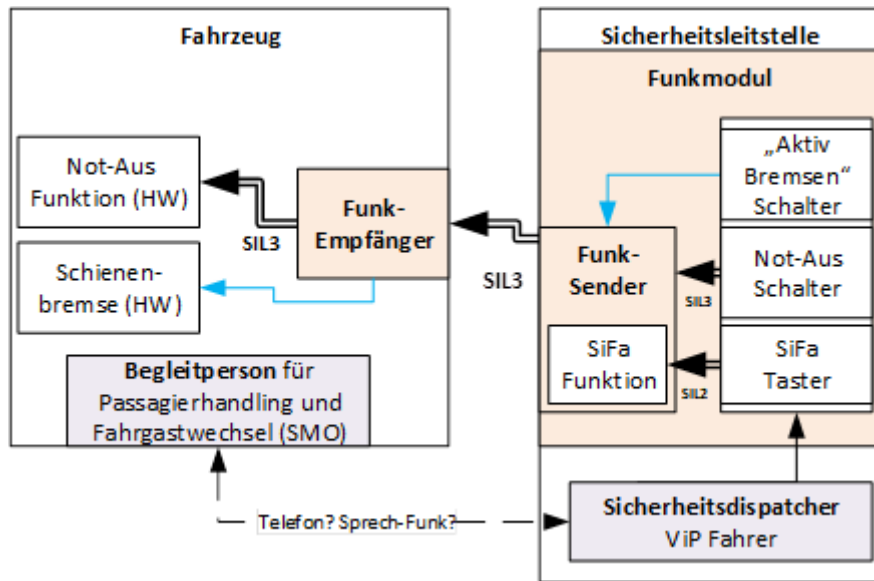


Abbildung 42: Überblick der SIL 3 Anforderung.

Die Frequenz der Funkfernsteuerung wird von der Bundesnetzagentur vorgegeben und beträgt 459,6 MHz. Diese Frequenz ist exklusiv für AStrID bestimmt und wird nicht an weitere Nutzer weitergegeben.

Zur Sicherstellung einer stabilen Funkverbindung wurde eine Funkplanung und -ausmessung des gesamten Betriebshofes der ViP im Vorfeld durchgeführt. Auf Grundlage dieser Funkausleuchtung, bei der unter anderem die Dämpfung zwischen Empfangsantenne und Sendeantenne berechnet wird, soll die genaue Ausstattung des Betriebshofes der ViP hinsichtlich der Anzahl an Verstärkern untersucht werden. Nach Test von 3 möglichen Antennenstandorten wurde der in Abbildung 43 dargestellte Standort direkt vor dem Ausgang der Abstellhalle ausgewählt. Mit Hilfe der Messergebnisse der Funkausleuchtung konnte ein Nachweis geliefert werden, dass keine Verstärker im Betriebshof der ViP benötigt werden, um eine stabile Funkverbindung herzustellen.

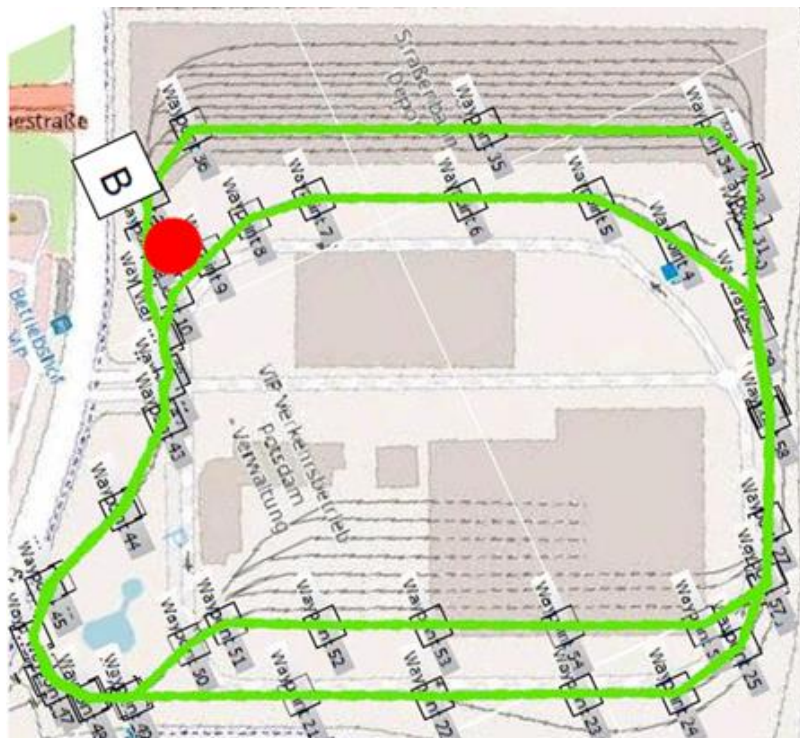


Abbildung 43: Ergebnisse Funkausleuchtung Antennenstandort Abstellhalle.



### Aktivierung der Funkfernsteuerung

Das Aktivieren des fahrzeugseitigen Empfängers wird immer über den Funksender ausgelöst. Solange der Empfänger nicht aktiv ist, ist die Sicherheitsschleife nicht geschlossen und das Fahrzeug kann nicht fahren. Aus diesem Grund muss die Funkverbindung zwischen Funksender und -empfänger aufgebaut werden, bevor das Fahrzeug den Befehl "Batterie ein" erhält. Der Funkempfänger ist am Dauerplus angeschlossen, somit kann die Funkverbindung vor dem Anschalten des Fahrzeuges aufgebaut werden. Sobald die Verbindung des Funkmoduls aktiv ist, kann das Fahrzeug aufgerüstet werden und der AStriD-Supervisor kann das Fahrzeug bei unerwartetem Verhalten zum Stillstand bringen.

### 2-Stufiger Not Aus

Die Funkfernsteuerung sollte einen 2-stufigen Not Aus realisieren. Dabei sendet der Sender ein (oder mehrere) Signal(e) an das Fahrzeug. Diese werden dort empfangen und greifen direkt in die Sicherheitsschleife ein. Es werden die folgenden 2 Stufen realisiert:

- **1. Stufe:** Aktive Auslösung der Magnetschienenbremse: Bei der ersten Stufe wird per Betätigung eines Kippschalters eine Magnetschienenbremse ausgelöst, mit der ein Bremsmanöver ausgeführt wird. Dabei wird die Magnetschienenbremse aktiv am Fahrzeug ausgelöst.
- **2. Stufe:** Auslösen der Sicherheitsbremse: Es wird zwischen den folgenden zwei Situationen unterschieden:
  - **Situation 1 – Funkabbriss:** Der Verlust der Kommunikationsverbindung zwischen Sender und Empfänger kann vom Empfänger detektiert werden. Dabei werden im 250ms Takt jeweils ein Datenpaket an den Funkempfänger gesendet. Kommt für einen Zeitraum von 1 Sekunde kein Telegramm am Funkempfänger an wird automatisch die 1. Stufe des Not Aus (Magnetschienenbremse) ausgelöst. Diese soll die Geschwindigkeit des Fahrzeuges stark reduzieren, sodass nach weiteren 4 Sekunden die Sicherheitsbremse ausgelöst wird und das Fahrzeug zum Stillstand kommt.
  - **Situation 2 – Notsituation:** Der Not Aus-Taster wird aufgrund einer Notsituation durch die Leitstelle ausgelöst mit sofortiger Wirkung der Sicherheitsbremse und allen ihren Auswirkungen (Flachstellen, unnötig langes Sanden).

### Totmannfunktion

Die Anwesenheit des AStriD-Supervisors muss per Totmantaster registriert werden. Hierfür muss der dafür vorgesehene Taster ständig betätigt werden. Lässt der AStriD-Supervisor den Taster los erfolgt ein Summer, dieser ertönt für 3 Sekunden. Betätigt der AStriD-Supervisor innerhalb dieser 3 Sekunden den Totmantaster, kann wie geplant weitergefahren werden. Bleibt die erneute Betätigung auch nach Ablauf der 3 Sekunden aus, wird von der Fahrzeugsteuerung aus automatisch eine maximale Betriebsbremse ausgelöst. Die Totmannfunktion ist im Funksender implementiert, die Übertragung erfolgt analog zur Not-Aus Funktion über den sicheren Weg zum Funkempfänger, siehe Abbildung 42.

## AP3: Integration und Erprobung

### Kurzbeschreibung des Arbeitspaketinhalts

Zur Erprobung der technischen Realisierung wurden Integrationstests zwischen einzelnen Teilsystemen durchgeführt und dokumentiert. Das Zusammenwirken aller Komponenten im Gesamtsystem wurde außerdem bei umfangreichen Testfahrten auf dem Betriebshof erprobt und optimiert.

Desweiteren wurden das vorhandene Sensorset unter verschiedenen Umgebungs- und Witterungsbedingungen auf seine Eignung getestet und ggf. Handlungsempfehlungen abgeleitet.

### Darstellung der Ergebnisse

Neben der Erprobung des Gesamtsystems wurden Integrationstests zwischen Fahrzeug- und landseitigen Komponenten sowie dem Data Hub durchgeführt. Dazu wurden Testpläne zur systematischen Abarbeitung der einzelnen Testschritte erstellt. Teilweise wurden Tests auch automatisiert mithilfe von Testdatensätzen durchgeführt. Es wurden die Schnittstellen und die Kommunikation folgender Systeme mit Komponenten des Data Hub getestet:

- Mobile App, REST-API (Azure Functions), MQTT-Broker und BMSBMSBMS

- SFTP-Zugang (für VAB-Betriebshofmanagementsystem), Skript zum Auslesen der Informationen, MQTT-Broker und BMSBMSBMS
- REST-API für Kartenaupload, aptly Package Server, MQTT-Broker, BMSBMSBMS und ADAS
- S7 Steuerung der Waschanlage, Schnittstelle zur Steuerung, MQTT-Broker und BMSBMSBMS

Vereinzelnt konnten im Systemverhalten Fehler festgestellt und behoben werden, in denen das beobachtete Systemverhalten nicht der Spezifikation entsprach (Meilensteine “Aufbau Testautomatisierung und Verifikation R1 abgeschlossen” und “Verifikation R2 abgeschlossen”).

Im Sommer 2021 wurden über mehrere Wochen hinweg umfangreiche Testfahrten zur Stabilisierung und Optimierung des Gesamtsystems durchgeführt. Es wurden dabei vor allem die Fahrmissionen 1.1, 2.1, 2.2, 2.3 und 3.1 abgefahren sowie das Auf- und Abrüsten und die Steuerung der Waschanlage getestet. Dabei konnte das Fahrzeug auch bei unterschiedlichsten Umweltbedingungen, wie starker Hitze oder Regen, getestet werden.

Die aufgetretenen Fehler wurden systematisch protokolliert und gesammelt. Sie konnten nach und nach verbessert bzw. behoben werden. Typische Fehler während der Testfahrten waren:

- Fehlerhafte Hinderniserkennung
- Verfehlung von Haltepunkten
- Verbindungsprobleme (Router, LTE-Verbindung) und sonstige Kommunikationsfehler
- Funkabriss Catron (Sicherheitssystem)
- Fehlendes Klingeln
- Fehlerhafte Signalerkennung/Überfahung Zwangshalt
- Kein selbständiges Anfahren des Fahrzeugs unter bestimmten Bedingungen
- Fehler Waschanlage (z.B. Erkennung des Fahrzeugs durch RFID-Leser als Beiwagen)
- Fehlerhafte Lokalisierung
- Sonstige Systemfehler

Die folgende Tabelle 20 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Testfahrten seit Juni 2021. Ein Testdurchgang umfasst in der Regel die Missionen 1.1, 2.1, 2.2, 2.3 und 3.1. Vereinzelnt wurden aber auch einzelne Missionen ausgelassen oder mehrfach hintereinander wiederholt. Die gelb markierten Fahrten wurden durch die Umgebung beeinflusst, z.B. Bremsen durch Zweige, die in den Lichtraum ragten oder geändertes Bremsverhalten bei hoher Umgebungstemperatur. Bei den rot markierten Durchgängen trat mindestens einer der oben genannten Fehler auf.

Es ist im Zeitverlauf deutlich erkennbar, dass die Anzahl der Fehler abgenommen hat. Insbesondere schwerwiegende Fehler wie Funkabriss Catron, Überfahung des Zwangshalt und Ausfall des LTE-Routers traten vor allem anfangs noch gehäuft auf und konnten später abgestellt werden (Meilensteine “Erprobungsphase Release 1 (Szenarien) mit Validierung und Optimierung abgeschlossen” und “Erprobungsphase Release 2 (Integration) mit Validierung und Optimierung abgeschlossen”).

Durchgang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	✓	Σ
01.06.2021	✗	✗	✓	✗	✗	✗					1	6
02.06.2021	✗	✗	✗	✗	✗						0	5
08.06.2021	✗	✗	✗	✗	✗	✓					1	6
10.06.2021	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓			5	8
17.06.2021	✓	✗	✓	✓							3	4
28.06.2021	✗	✗	✗	✓	✗	✓					2	6
29.06.2021	✓	(✓)	(✓)	✗	(✓)	(✓)	✗	(✓)	✓		7	9
30.06.2021	(✓)	✗	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)					5	6
01.07.2021	(✓)	(✓)									2	2
07.07.2021	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	7	10
14.07.2021	✗	(✓)	✓	✓	✓	✗	✓	(✓)			6	8



02.08.2021	(✓)	(✓)	(✓)	✓							4	4
03.08.2021	✓	✗	✓	✓	(✓)	✓	✓	✓	✓		8	9
04.08.2021	✗	✓	(✓)	✓	✓	✓	✗	✓			6	8
05.08.2021	✓	✓	✓	✓							4	4

Tabelle 20: Übersicht Testdurchgänge

### Weitere Testergebnisse und Handlungsempfehlungen

Über genannten Testzeitraum hinaus wurde das Gesamtsystem in zahlreichen Testfahrten und Demonstrationen weiterhin erprobt. Insbesondere bei der Hinderniserkennung und der Lokalisierung konnte weiterer Optimierungsbedarf ermittelt werden (Meilenstein “Erprobungsphase Release 2b (unterschiedliche Umgebungsbedingungen) mit Validierung und Ableitung von Handlungsempfehlungen abgeschlossen”).

#### Betriebshof-Management-System

Im Testbetrieb auf dem Gelände der ViP zeigte sich der vom Einsatz des BMS versprochene Nutzen.

Ziel war es den AStriD-Dispatcher in seiner Rolle durch Bereitstellung von Informationen und diverse Steuerungsmöglichkeiten bestmöglich zu unterstützen. Im Folgenden wird daher auf die einzelnen Aspekte eingegangen, in denen sich dieser Nutzen zeigen konnte.

Im Erprobungsbetrieb zeigte sich, dass eine frühzeitige Erkennung falsch gestellter Weichen wichtig ist, um Abweichungen der Route von der eigentlichen Mission sofort erkennen und die Mission gegebenenfalls frühzeitig abbrechen zu können und somit unnötige Rangierfahrten und manuelle Neulokalisierungen zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde eine deutlich sichtbare Markierung von der Route abweichender Weichen in die Oberfläche des Betriebshof-Managementsystems eingebaut, die dem AStriD-Dispatcher sofort signalisiert, dass die eingestellte Route nicht der ursprünglich angeforderten Route entspricht.

Im Erprobungsbetrieb zeigte sich, dass der Einsatz des Betriebshof-Managementsystems geholfen hat, eine falsche Lokalisierung des Fahrzeugs frühzeitig zu erkennen. Durch die Darstellung der Position des Fahrzeugs kann der AStriD-Dispatcher sehr schnell erkennen, wenn die Lokalisierung des Fahrzeugs nicht mehr der tatsächlichen Route entspricht. Dadurch konnten Fehlersituationen frühzeitig erkannt und teils schneller behoben werden.

Durch die Darstellung anderer Straßenbahnen im Depot hatte der AStriD-Dispatcher jederzeit einen Überblick über die Depotsituation, um entscheiden zu können, ob eine gewünschte Route befahrbar war. Das erleichterte die Kommunikation mit dem Betreiber des Betriebshofs, da somit Fahrwege nicht angefordert werden mussten, wenn bereits zu erkennen war, dass diese nicht befahren werden können.

Ebenso war die Darstellung des Waschanlagenstatus hilfreich, um eine Blockierung der Strecke durch die Waschhalle zu erkennen und so gegebenenfalls eine geplante Fahrt um die Waschhalle herum zu führen und somit den Testbetrieb aufrecht erhalten zu können ohne erst nach Ankunft in der Waschhalle zu erkennen, dass eine Fahrt durch diese aktuell nicht durchgeführt werden kann. Dies war insbesondere dadurch hilfreich, dass die Waschanlage nicht nur für Straßenbahnen genutzt wird, deren Position vom Betriebshofmanagementsystem der ViP übermittelt wird, sondern auch für Busse, deren Position jedoch nicht übermittelt wird und daher auch nicht im Gleisbild dargestellt werden kann. Durch die Darstellung einer aktiven Waschanlage ohne ein dem Betriebshof-Managementsystem bekanntes Fahrzeug konnte die Belegung der Waschhalle dennoch erkannt werden.

Das Betriebshof-Managementsystem hat durch die Bereitstellung aller für den autonomen Betrieb relevanten Informationen an einem Arbeitsplatz eine aufgabenorientierte Durchführung der dispositiven Tätigkeiten unterstützt. Der Testbetrieb wurde durch die Bündelung der Informationen unterstützt, um Ansätze für etwaige Analysen schnell zu finden und auch den Regelbetrieb der Testfahrten so zu erleichtern, wie es auch für einen kommerziellen Einsatz im regulären Betrieb gewünscht ist. Durch die Darstellung der Zustände unterschiedlicher beteiligter Subsysteme konnten Störungen schnell erkannt werden.

### *Praxistauglichkeit*

Die Erfahrungen aus dem Probetrieb sind zu großen Teilen auch auf einen Produktiveinsatz im autonomen Betrieb anwendbar. Die Unterstützung, die das Betriebshof-Managementsystem im Testbetrieb bietet, ist ebenso im kommerziellen Einsatz hilfreich.

Die segmentweise Darstellung der Fahrzeugpositionen entspricht den Erfordernissen des regulären Betriebs und orientiert sich an den Bedürfnissen des tatsächlichen Betriebs im Depot. Eine exaktere Positionierung der Zugsymbole in der Bedienoberfläche des Betriebshof-Managementsystems ist durch die Verfügbarkeit der exakten Koordinaten zwar möglich, sollte das für einen Betriebshof von Interesse sein, wird jedoch nicht aktiv angestrebt, da die segmentweise Darstellung auch für den Einsatz autonom fahrender Trams in der Regel den praxisnaheren Ansatz darstellt.

Der Einsatz von Symbolen und hier insbesondere die Verwendung klar unterscheidbarer und deutlich sichtbarer Farben, etwa für das Fahrzeug, die eingestellte Mission, die Waschanlage und das Hallentor, etc., lenkt den Fokus auf die für den Disponenten aktuell wichtigen Informationen. Es ist schnell sichtbar, ob sich ein Fahrzeug noch in seiner Mission befindet oder diese bereits abgeschlossen hat. Damit ist für den AStriD-Dispatcher schnell ersichtlich, ob für diesen gerade Handlungsbedarf besteht. Insbesondere auch Fehlerzustände sind deutlich sichtbar zu erkennen und lenken die Aufmerksamkeit des Disponenten auf die entsprechenden Stellen.

Die Praxistauglichkeit der Betriebshof-Managementsystems wurde während der Erprobungsphase kontinuierlich verbessert. Durch den ständigen Einsatz des Systems für die Durchführung von Fahrten konnte Verbesserungspotential erkannt werden und entsprechende Anpassungen für den weiteren Betrieb vorgenommen werden.

So ergab sich die Notwendigkeit der Visualisierung von der Mission abweichender Weichenlagen durch die Erkenntnis, dass solche Situationen im Betrieb tatsächlich entstehen können und eine frühzeitige Erkennung für eine entsprechende Umplanung der Fahrten wichtig ist. Auch im kommerziellen Betrieb ist eine solche frühzeitige Erkennung einer solchen Abweichung ein entscheidender Punkt bei der Unterstützung des Disponenten.

Die Bedingungen für die Freischaltung der einzelnen Bedienfelder wurden den Situationen, die sich im Betrieb ergeben, entsprechend angepasst. Das Konzept des Betriebshof-Managementsystems sieht vor, dass nur die Bedienfelder bedienbar sind, die im jeweiligen Zustand sinnvoll zu bedienen sind. Durch die Komplexität der beteiligten Subsysteme zeigte sich das Zusammenspiel der einzelnen Zustände erst in der tatsächlichen Nutzung. Welche Bedienungen in welchen Zuständen regulär bedienbar bleiben sollen, wurde so den Erfahrungen bei der Nutzung des Gesamtsystems angepasst.

### Hinderniserkennung/Lokalisierung bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen

#### *Einfluss auf Lichtsignalerkennung mit Kamera*

##### *Tiefstehende Sonne – Blendung des Sensors*

Im Rahmen der Erprobung wurde eine Blendung des Kamerasensors durch eine tiefstehende Sonne beobachtet. Diese sind zum größten Teil zeitabhängig, können aber durch Spiegelung/Reflexion an statischen sowie dynamischen Objekten auch anderen Orten und zu anderen Zeiten auftreten. Eine Linderung des Problems mittels optischer Filter, wurde nicht tiefgründig erprobt, da anfängliche Laborversuche Schwierigkeiten mit dem verwendeten Algorithmus zeigten.

##### *Tiefstehende Sonne – Blendung des Signals*

Ebenso schwierig gestaltete sich Erkennung im Falle eines überblendeten Signals durch tiefstehende Sonne. Dieses Problem tritt nur selten und immer tageszeitabhängig auf, aber lässt sich ohne Eingriff in die Infrastruktur nicht beheben.

##### *Dunkelheit*

Im Rahmen von Fahrten ab der Abenddämmerung bis in die Nacht hinein, konnten Probleme mit den verwendeten Detektoren festgestellt werden. Diese sind auf einen Zwischenschritt des Algorithmus zurückzuführen: die Lichtsignale wurden aus Gründen der Eindeutigkeit mit ihrem Signalkörper einge-

lernt. Diese Kontur lässt sich mit abnehmender Helligkeit nicht mehr detektieren. Lässt man andererseits die Kontur des Signalkörpers weg, so ergeben sich Mehrdeutigkeiten mit anderen, umliegenden, aktiv leuchtenden Objekten, wie zum Beispiel Wohnungs- und Bürofenster oder Reklametafeln.

### Niederschlag

Die Einflüsse von Niederschlag auf Kamerasensoren unterteilen sich grob in Nah- und Ferneinflüsse. Während der Einfluss aus der Ferne von der Partikeldichte im Blickfeld abhängt, so ist es beim Naheinfluss der Beschlag/Befall der Frontscheibe. Zur Linderung der Naheinflüsse wurde ein Scheibenwischerkonzept erfolgreich erprobt.

### Fazit

Aufgrund der Vielzahl von Schwierigkeiten und der damit verbundenen Aufwände, sollte auf den Einsatz einer sensorbasierten Lichtsignalerkennung verzichtet werden. Parallelaufende Projekte zeigen vielversprechende Lösungsmöglichkeiten unter der Nutzung von Funktechnologien auf. Ein Beispiel hierfür wäre die Kommunikation mit der Infrastruktur: Rail-2-X.

### *Einfluss auf Objekterkennung mit Kamera*

#### Tiefstehende Sonne – Blendung des Sensors

Siehe Abschnitt “Einfluss auf Lichtsignalerkennung – Blendung des Sensors”.

#### Dunkelheit

Wie auch bei der Erkennung von Lichtsignalen, verändern sich die zu erkennenden Objektkonturen signifikant. Während man bei einem motorisierten Fahrzeug im Straßenverkehr noch die vorgeschriebene Beleuchtung detektiert, so ist dies bei unbeleuchteten oder nicht aktiv leuchtenden Objekten, wie zum Beispiel Personen, nicht der Fall. Lösungsmöglichkeiten wären hier die Verwendung von bildstabilen Kamerasensoren, wie zum Beispiel Wärmebild-Kameras oder solche mit Detektionsfähigkeit im nahen Infrarotbereich (“Near-Infra-Red (NIR)”-Kameras).

### Niederschlag

Siehe Abschnitt “Einfluss auf Lichtsignalerkennung – Niederschlag”.

### Fazit

Ebenso wie bei der Lichtsignalerkennung, wird von einer Objekterkennung ausschließlich mittels Kamera abgeraten. Stattdessen wird der Einsatz eines Lidars als Basissensors empfohlen, da dieser auf Grund seines tageszeitunabhängigen Messprinzips für einen erheblich längeren Betriebszeitraum eingesetzt werden kann. Weiterhin bietet der Lidar die für die sichere Navigation benötigte Ortsgenauigkeit von gemessenen Objekten, welche mit einem rein kamerabasierten System nur schwer zu erreichen wäre.

### *Einfluss auf Objekterkennung mit Lidar*

#### Tiefstehende Sonne – Blendung des Sensors

Eine Blendung der Lidarsensoren konnte nur bei Typen der älteren Generation festgestellt werden. Dies lässt sich auf die verwendete Sensortechnik und die damit verbundene Lichtwellenlänge zurückführen. Während ältere Systeme – aus Sicherheitsgründen – eher Wellenlängen von 1550 nm verwendeten so sind es bei heutigen vornehmlich 905 nm.

#### Dunkelheit

Bei Dunkelheit konnten keine Beeinträchtigungen der Sensoren festgestellt werden. Dies ist in der Tatsache begründet, dass es sich bei Lidarsensoren um aktiv aussendende Messinstrumente handelt.

### Niederschlag

Ähnlich wie bei Kamerasensoren sind Lidarsensoren auch nahen und fernen Einflüssen ausgesetzt. Nahe Einflüsse, wie Regen- oder Schneebefall, lassen sich durch optimierte Einbaupositionen lindern. Ferne Einflüsse sind wie auch bei den Kameras stark von der Dichte der Niederschlagspartikel abhängig. Obwohl sich diese Einflüsse teilweise durch den Einsatz von 905 nm Sensortechnologie verringern

lassen, so treten sie im Alltag dennoch spärlich, aber “willkürlich” auf. Als Beispiele hierfür, wären die Gischts von vorrausfahrenden Fahrzeugen oder eine defekte Leitung an einer betriebsinternen Waschstraße zu nennen.

### Fazit

Trotz der Schwierigkeiten bei starkem Niederschlag, stellten sich die Lidarsensoren allein auf Grund ihrer ganz täglichen, nicht durch Lichtverhältnisse beeinflussten, Einsatztauglichkeit als der Hauptsensor eine robusten Objekterkennung aus. Ziel für eine spätere, marktfähige Lösung wird es sein, eine Sensor-Blindheit so genau wie möglich zu erkennen, um so die Ausfallzeiten durch extremen Niederschlag so gering wie möglich zu halten.

### *Einfluss auf Lokalisierung mit GNSS*

#### Bewölkung mit und ohne Niederschlag

Als der Haupteinflussfaktor von Witterungsbedingungen auf die Lokalisierungsgenauigkeit unter Verwendung von GNSS-Sensoren stellt sich – wie zu erwarten – die allgemeine Bedeckung des Himmels heraus. Schon eine leichte Wolkendecke verringert die Genauigkeit so weit, dass eine präzise Steuerung des Fahrzeugs nicht mehr gewährleistet werden kann. Selbst bei der Verwendung von Differential-GPS oder Real-Time-Kinematics konnten diese Einflüsse nicht so weit minimiert werden, dass eine zuverlässige Lösung garantiert ist.

### Fazit

Da es sich bei der Lokalisierung im demonstrierten Prototyp um eine sicherheitskritische Komponente handelt, sollte neben einem GNSS auch eine weitere fahrzeugbasierte Technologie, wie zum Beispiel die während des Projektes prototypische implementierte Lösung einer Landmarken-Lokalisierung hinzugezogen werden.

## AP4: Übertragbarkeit und Bewertung

### Kurzbeschreibung des Arbeitspaketinhalts

Das AP4 zielte auf die Abstraktion der Projekterkenntnisse, sowie die Herstellung eines Modells zwecks Untersuchung der Übertragbarkeit für die Anwendung der Ergebnisse auf weitere Betriebshöfe. Das AP4 gliedert sich demnach in das AP4.1 zur Untersuchung der Übertragbarkeit, das AP 4.2. für die ökonomische Bewertung und das AP 4.3 für die Analyse und Bewertung der rechtlichen Rahmenbedingungen.

### Darstellung der Ergebnisse

#### AP 4.1: Untersuchung und Umsetzung der Übertragbarkeit des Betriebshofkonzeptes

Für die Sicherstellung der Übertragbarkeit eines abstrahierten Konzepts, wird dieses in ein generisches Modell übertragen (M1 08/2022). Dabei sind neben den beteiligten Instanzen auch deren Berührungspunkte, Schnittstellen und ausgetauschte Informationen enthalten. Das Modell ist modular aufgebaut. Auf diese Weise können weitere Verkehrsunternehmen die bei ihnen auf dem Depot vorhandenen Parteien/Instanzen gezielt in ein für ihr eigenes Depot gültiges Modell aufnehmen.

Der Vergleich des in AP1 aufgestellten Konzepts für den Betriebshof in Potsdam mit bestehender Expertise, Austausch mit weiteren Verkehrsunternehmen und Durchführung weiterer Projekte mit ÖPNV-Bezug zeigte, dass sich ein gemeinsames Modell für sowohl Straßenbahn- als auch Busdepots eignet.

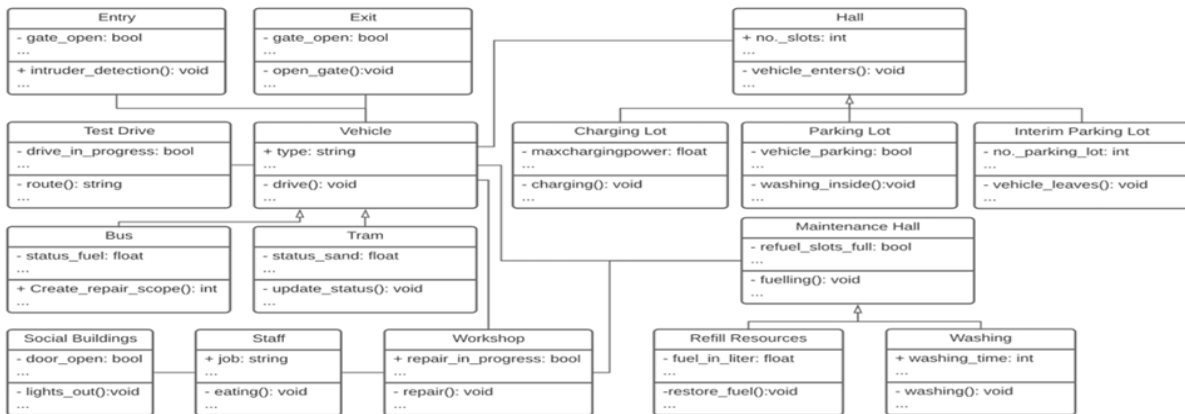


Abbildung 44: Klassendiagramm eines generischen Modells eines Betriebshofes im ÖPNV nach Brenner/Rossel/Sax<sup>11</sup>.

Für die Erstellung und Visualisierung des Modells wurde Wert auf die Definition eines Modells nach Stachowiak gelegt. Daraus ergeben sich folgende drei Charakteristika:

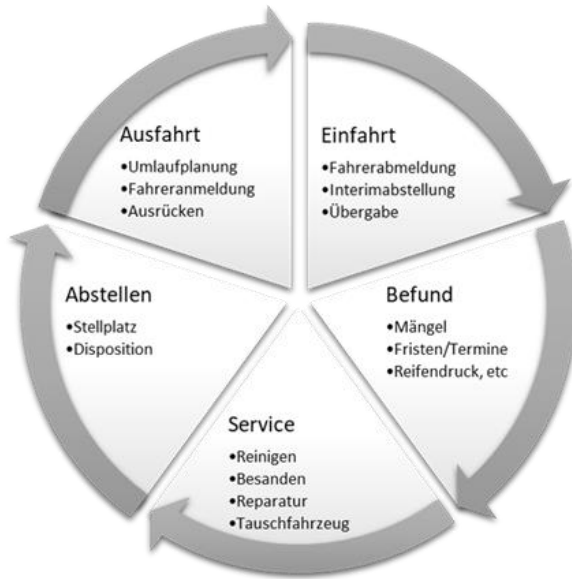
- Abbildungsmerkmal: Ein Modell ist immer ein Abbild des Originals
- Verkürzungsmerkmal: Ein Modell umfasst nicht alle Attribute und Eigenschaften des Originals
- Pragmatismusmerkmal: Ein Modell ist nicht eindeutig seinem Original zuzuordnen.

Durch Abbildung des Depots in einem Klassendiagramm (siehe Abbildung 44<sup>11</sup>), welches Teil der Unified Modeling Language (UML) bildet, sind neben den drei Merkmalen auch die Anforderung nach einer standardisierten Beschreibungsmethode erfüllt. Da nur relevante und repräsentative Instanzen und Eigenschaften dargestellt werden, ist kein Rückschluss auf ein spezielles Depot möglich.

Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Instanzen sind aus dem Klassendiagramm (schematisch dargestellt in Abbildung 44) klar ersichtlich. Die benötigten Informationen, Schnittstellen, aber auch Gemeinsamkeiten können identifiziert werden. Als Beispiel sei hier die Klasse *vehicle* genannt. Diese besitzt unterschiedliche Beziehungen, wie zu Ein- und Ausfahrt aber auch zur Abstellhalle. Durch die im Klassendiagramm typisch verwendete „Vererbung“ genutzte Verbindung zu *tram* und *bus* zeigt aus, dass beide „Kindklassen“ die gleichen Beziehungen besitzen. Dennoch können die Beziehungen näher definiert werden: ein elektrifizierter Bus würde in der Abstellhalle einen Ladeplatz *Parking Lot* benötigen, eine Straßenbahn ein Abstellgleis *Parking Lot*. Die jeweiligen Informationen sind in dem Klassendiagramm ebenfalls enthalten, als „Kindklassen“ der Klasse *Hall*.

Auf Basis des Klassendiagramms wurden weitere Visualisierungsmethoden genutzt, um beispielsweise einzelne Instanzen näher auf ihr Automatisierungspotential und damit einhergehende Benefits zu untersuchen. Dabei wurde zum Einen ein Ringdiagramm, mit Fokus auf den zyklischen Charakter der Betriebsbereitmachung (siehe Abbildung 45), zum Anderen ein morphologischer Kasten, mit Fokus auf die Variantenvielfalt der stattfindenden Prozesse (siehe Abbildung 46) erarbeitet.

<sup>11</sup> Brenner, Nathalie, Nicole Rossel, and Eric Sax. "Automation Potentials in Public Transport based on a Depot Model." VEHTS. 2022.



**Abbildung 45: Darstellung der Prozesse der täglichen Betriebsbereitmachung als Ringdiagramm mit dem Fokus auf die zyklische Wiederholung der Tätigkeiten nach Brenner/Rossel/Sax<sup>11</sup>**

Anhand des Ringdiagramms, welches sich in fünf Teilschritte unterteilt, wurden die einzelnen Schritte auf ihr Automatisierungspotential, sowie zugehörige Lösungsmöglichkeiten untersucht. Beispielsweise gilt für die Einfahrtskontrolle ein hohes Potential zur Automatisierbarkeit, mit unterschiedlichen Umsetzungsmöglichkeiten. Der Schwerpunkt ist dabei auf die Identifikation des Fahrzeuges zu setzen. Eine solche Identifikation kann visuell, per Bildaufnahmen einer ID am Fahrzeug, erfolgen oder aber per Datenübertragung über eine definierte Schnittstelle (Lesen eines RFID-Chips, Anmeldung über Funkverbindung, etc). Daneben gilt für die Services, welche nach Bedarf durchzuführen sind, eine große Variabilität hinsichtlich der Automatisierbarkeit. In den Ausführungen zu API wurde bereits auf die Services des Waschvorgangs und der Besandung

eingegangen. Für Services wie der Reparatur eines Fahrzeuges gilt zum derzeitigen Zeitpunkt, dass sie durch geschultes Werkstattpersonal durchgeführt werden müssen. Für die Ausfahrt wiederum können die gleichen Annahmen wie für die Einfahrt herangezogen werden. Auch hier bestehen mehrere Möglichkeiten der Umsetzung einer Automatisierung.

Um nun einzelne Betriebsbereitmachungsszenarien auf ihr Automatisierungspotential untersuchen zu können, eignet sich die Darstellung als morphologische Matrix. Hier kann für jeden Teilschritt des Ringdiagramms nun ein höherer Detailgrad gewählt werden. Abbildung 45 zeigt neben den Auslegungen eines Betriebshofes auch die Auswahl eines Szenarios. Nach Einfahrt des Fahrzeuges wird sowohl der Zustandsvektor als auch das Vorhandensein einer Störung übertragen. Als Folge muss die Straßenbahn nicht nur in die Werkshalle, sondern auch in die Werkstatt. Nach erfolgter Reparatur wird die Straßenbahn auf einer Interimsabstellfläche abgestellt und im Anschluss für den geplanten Umlauf zur Ausfahrt gebracht.

Der Morphologische Kasten bietet dabei die Möglichkeit der Untersuchung von über 15 000 Varianten. Allerdings treten hierbei logische Überschneidungen und Ausschlüsse einzelner Teilschritte auf. Durch logische Einschränkungen wie

- Weist ein Fahrzeug eine Störung auf, sind die Serviceauswirkungen eines Bagatellschadens unerheblich
- Weist ein Fahrzeug einen Unfallschaden auf, sind die Serviceauswirkungen eines Bagatellschadens oder einer Störung unerheblich

Könnte die Anzahl an Variationen auf ca. 80 reduziert werden. Diese Kombination aus Einzelsequenzen kann nun auf ihr Effizienzpotential untersucht werden. Durch Automatisierung entfällt neben der reinen manuell durchgeführten Fahrzeit gegeben falls auch unnötige Wartezeiten auf einen freien Mitarbeiter für die Durchführung eben dieser Fahrbewegung (Visualisierung in Abbildung 47).



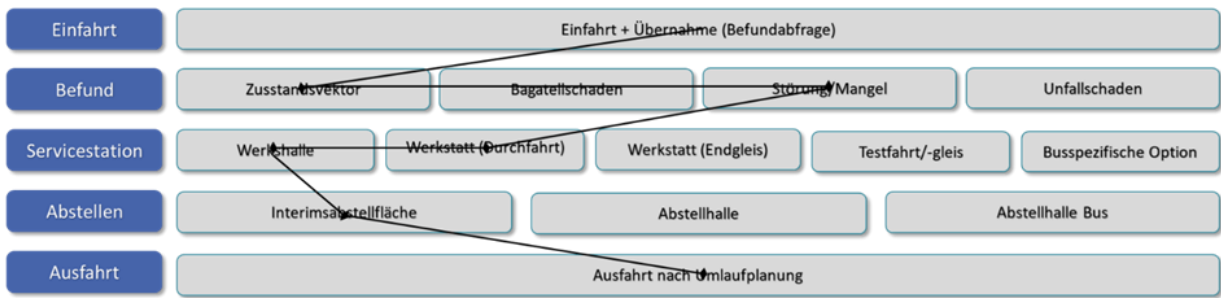


Abbildung 46: Darstellung der Prozesse der täglichen Betriebsbereitmachung als Morphologischer Kasten mit dem Fokus auf die Variantenvielfalt nach Brenner/Rossel/Sax<sup>11</sup>

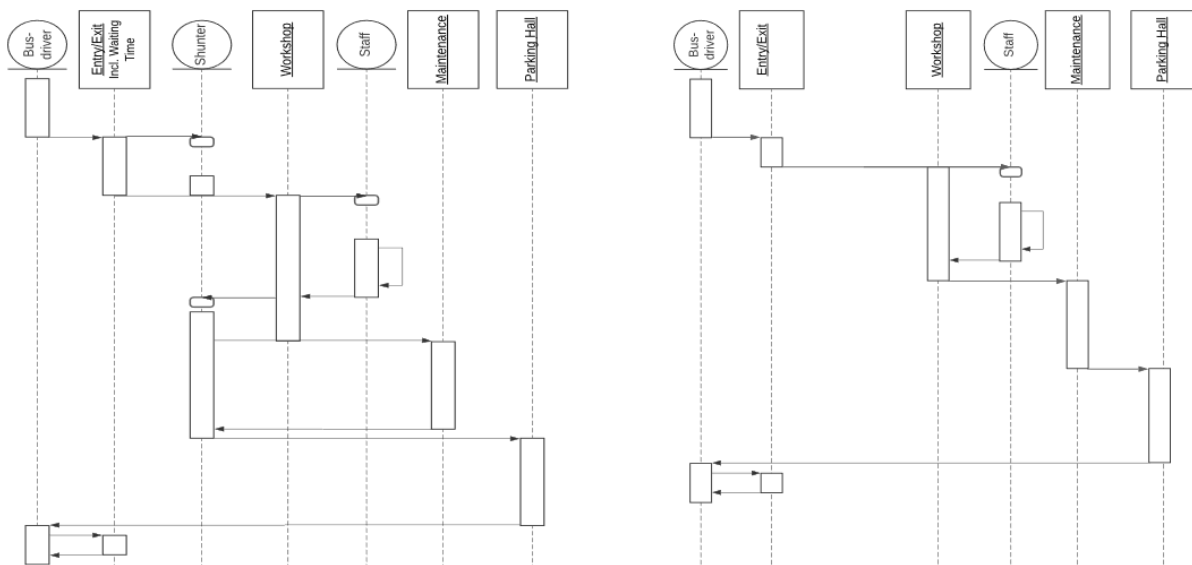


Abbildung 47: Sequenzdiagramm für das Abbildung 46 gezeigte Szenario (links) mit Rangierer/Mitarbeiter und (rechts) im automatisierten Fall nach Brenner/Rossel/Sax<sup>11</sup>

#### AP 4.2: Ökonomische Bewertung – Analyse und Konzept

Um die Analyse bedarfsgerecht auszugestalten, wurden in Anlehnung an die Ergebnisse aus AP 4.1 die ausschlaggebenden Prozesse<sup>12</sup> und Schnittstellen für die Zeiteffizienzanalyse in einzelne Szenarien aufgeschlüsselt. Darauf aufbauend wurden die einzelnen Szenarien der Prozessabfolgen auf dem Betriebshof konsolidiert und die Datengrundlage für bereits existierende Zeitmessungen der Prozesse recherchiert. Für die übrigen, erforderlichen Daten, die sich insbesondere auf die Zeitbedarfsmessung spezieller Prozesse wie etwa das Besanden, Waschen oder Parken von Straßenbahnfahrzeugen beziehen, wurde eine Methodik zur Zeitmessung auf dem Betriebshof der ViP entwickelt und abgestimmt. Entsprechend des abgestimmten Konzepts wurden jeweils 10 Zeitmessungen für die Prozesse Besanden, Waschen, Wechsel des Personals Service bzw. Werkstatt und Fahrpersonal sowie für Fußwege zwischen den Prozessen durchgeführt.

<sup>12</sup> Es sei in diesem Zusammenhang explizit darauf hingewiesen, dass im Rahmen des Projekts die Bezeichnung „Service-Prozesse“ verwendet wird und damit alle im Rahmen der Analyse und Berechnung betrachteten Prozesse auf dem Betriebshof gemeint werden. In diese Definition inbegriffen sind Prozesse, die branchenüblich nicht als „Service-Prozesse“ bezeichnet werden, da sie beispielsweise durch andere Personalgruppen und nicht durch Service-Personal durchgeführt werden. Dies betrifft beispielsweise das Auf- und Abrüsten von Fahrzeugen, das im Rahmen der vorliegenden Analyse berücksichtigt wurde, jedoch üblicherweise durch Fahrpersonal ausgeführt wird.

Als Ergebnis wurden die Standardabweichungen, der Median sowie der Mittelwert in Boxplot- Diagrammen dargestellt, um die Abweichungen in den Zeitmessungen zu quantifizieren. Aufgrund geringer Standardabweichungen in den Messungen wurden als Basis für die Ergebnisse zum Meilenstein M1 03/2022 die Durchschnittswerte der Zeitmessungen für die Zeiteffizienzanalyse verwendet.

Zur Vorbereitung der Ermittlung der Zeiteffizienz wurde je Basis-Szenario ein Pre-Automatisierungs- und ein Post-Automatisierungs-Szenario erstellt. Die Effizienz der Automatisierungstechnologie ergibt sich demnach aus der Vergleichsrechnung zwischen Zeitbedarf im Pre-Automatisierungs- und Zeitbedarf im Post-Automatisierungs-Szenario. Zum finalen Abgleich der Zeiteffizienz wurden die Ergebnisse aus den vorangegangenen Arbeitsschritten zur Kalkulation herangezogen und der Zeitgewinn in bezahlten Arbeitsstunden je Vergleichsszenario errechnet (s. Abbildung 48). Im Zusammenhang dieser Arbeiten ist zudem eine Masterarbeit an der Technischen Universität Berlin entstanden<sup>13</sup>, der detaillierte Ergebnisse zu entnehmen sind.

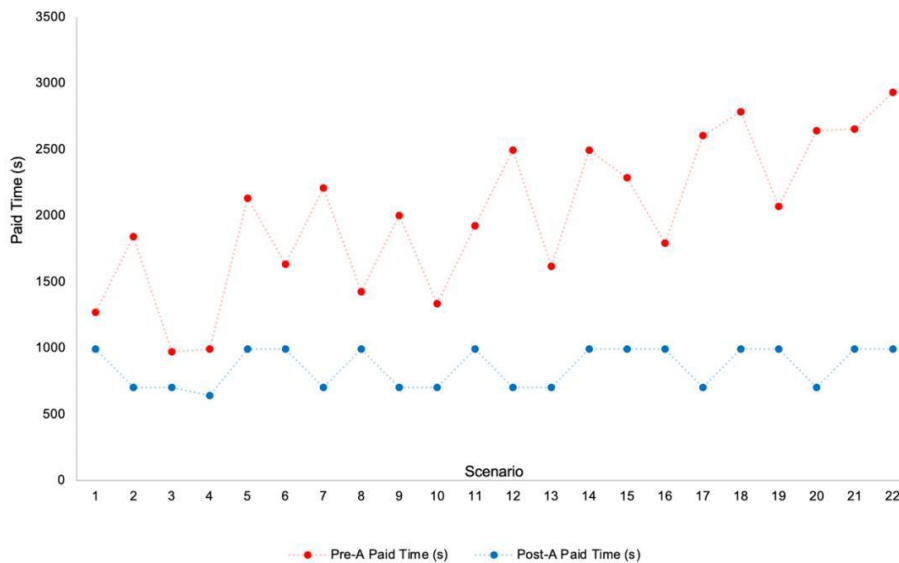
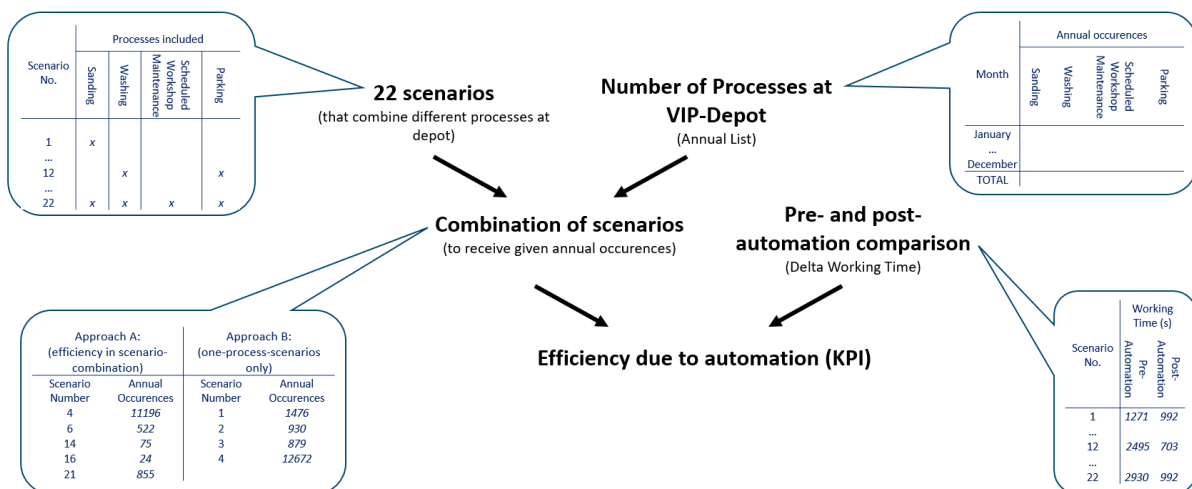


Abbildung 48: Zeiteffizienz aufgrund der Automatisierung in bezahlter Arbeitszeit<sup>13</sup>

Der errechnete Zeitgewinn wurde mit der auftretenden Häufigkeit der jeweiligen Prozessabläufe über ein Jahr auf dem ViP-Betriebshof verschnitten, um das Delta der bezahlten Arbeitszeit zwischen einem konventionellen und automatisierten Betriebshof über ein Jahr zu ermitteln. Eine Übersicht zur angewendeten Methodik ist der Abbildung 49 zu entnehmen.



<sup>13</sup> „Impact Analysis of Autonomous Trams in Depot”, Abdulghani Al Sabouni; Masterarbeit, Technische Universität Berlin, 12. Oktober 2021.

### Abbildung 49: Schematische Darstellung der angewendeten Methodik zum Abgleich der konventionellen und automatisierten Betriebsprozesse

Im Sinne des Abgleichs der konventionellen und automatisierten Betriebsprozesse (Meilenstein M1 03/2022) resultiert demnach ein gemittelttes Delta der bezahlten Arbeitszeit durch die Automatisierung von 1.609,5 Stunden über ein Jahr auf dem Betriebshof Potsdam<sup>14</sup>. Unter der Annahme eines mittleren Gegenwerts von 30,00€ je bezahlter Arbeitsstunde ergibt sich ein monetäres Delta von rund 50.000€.

Es ist grundsätzlich davon auszugehen, dass ein Geschäftspotential auch auf weiteren Betriebshöfen in der ÖPNV-Branche gegeben ist. Die Effizienz der Einführung autonomer Straßenbahnen in einem spezifischen Betriebshof kann jedoch variieren und hängt wesentlich von den folgenden Faktoren ab:

1. Die Fähigkeit der Straßenbahnfahrzeuge sich autonom zum/im Betriebshof zu bewegen, sobald das Fahrpersonal den Fahrdienst beendet hat.
2. Das physische Layout, die Größe und der Standort des Betriebshofs.
3. Der Standort der Dienstgebäude für das Fahrpersonal.
4. Die Anzahl der jährlich erforderlichen Wartungs- und Abstellvorgänge.

Zur Verifizierung und weiteren Analyse der Übertragung der bisherigen Ergebnisse auf weitere Betriebshöfe wurde eine Befragung per Fragebogen mit drei Expert\*innen der Branche durchgeführt. Eine Übersicht zu den wesentlichen Ergebnissen der Befragung ist dem Anhang 4 zu entnehmen.

Die Auswertung der Expert\*innenmeinungen bestätigt den zugrunde gelegten Analyseansatz. Es herrschen jedoch geteilte Meinungen unter den Expert\*innen vor, ob und wie umfassend das ökonomische Potential einer Vollautomatisierung von Straßenbahnfahrzeugen auf Betriebshöfen insgesamt ausfällt.

Insbesondere wird die perspektivisch stärkere Notwendigkeit speziell geschulten Personals hervorgehoben, besonders in den Bereichen „Service“ und „Systempflege“. Die Befragten gehen zudem davon aus, dass in zukünftigen automatisierten Straßenbahndepots zusätzliches Personal für die Systemwartung und andere system- und technikbezogene Tätigkeiten benötigt wird. Diesbezüglich ist jedoch unklar, wie viel zusätzliches Personal erforderlich sein wird und was genau die Aufgaben sein werden, eine Quantifizierung des zukünftigen Personalbedarfs scheint somit derzeit nicht möglich.

Die Mehrheit der Befragten kommt demnach zur Schlussfolgerung, dass automatisierte Straßenbahndepots die Betriebskosten insgesamt erhöhen werden. Bezüglich der Investitionskosten ergibt sich kein einheitliches Meinungsbild. In diesem Zusammenhang werden von den Expert\*innen zudem möglicherweise bisher nicht vorhersehbare, „versteckte“ Kosten angebracht, insbesondere bezüglich der Wartung der Technologie, die eine belastbare Aussage zur Wirtschaftlichkeit erschweren.

Zur Finalisierung der Arbeiten im AP 4.2 und Abschluss des Meilensteins M2 09/2022 wurden die zuvor ermittelten ökonomischen Ergebnisse unter Einbezug der zu erwartenden Kosten für den Einsatz der Technologie bewertet.

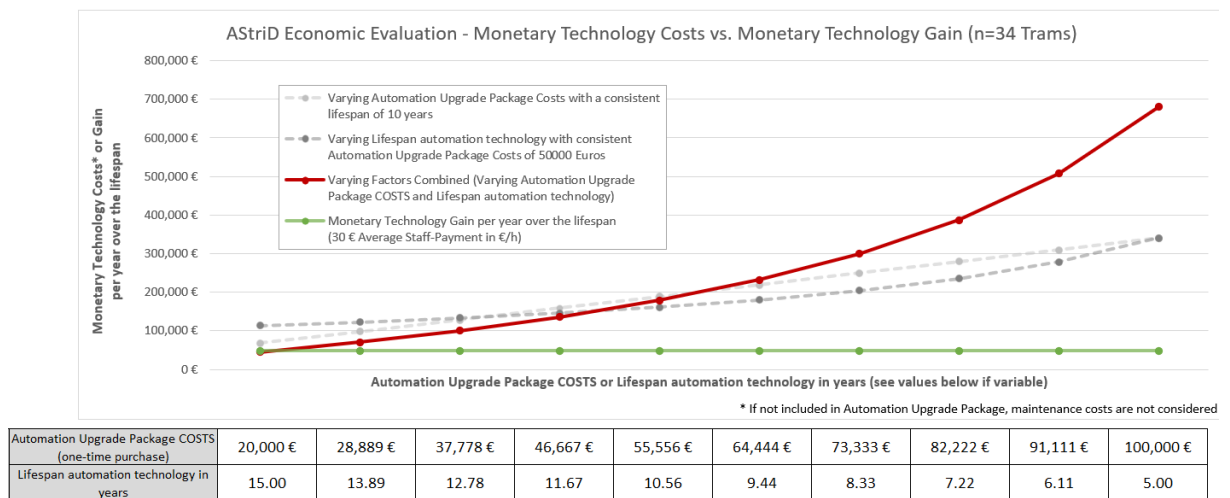
Auf Grundlage eines rudimentären Berechnungsansatzes wurde eine Bandbreite an möglichen Gesamtkostenwerten pro Jahr ermittelt. Da wesentliche Faktoren der Gesamtkosten, etwa der zukünftige Preis eines „Autonomy-Upgrade-Packages“ für eine Tram sowie die Lebensdauer der verbauten Technologie derzeit nicht bekannt sind, wurde auf einen komplexen Kostenberechnungsansatz verzichtet und ein Intervall von Annahmen für diese Faktoren getroffen. Dies ist bezüglich der Aussagekraft der nachfolgend dargestellten Ergebnisse und insbesondere der absoluten Zahlenwerte zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der Lebensdauer ist gemittelt berücksichtigt, dass Ausfälle der Sensorik vorkommen und ein Tausch dieser Komponenten nötig werden kann. Dies bedeutet jedoch keinen vollständigen Tausch aller im Rahmen des „Autonomy-Upgrade-Packages“ verbauten Komponenten, d.h. nicht das Überschreiten der Lebensdauer, sodass eine Lebensdauer des „Autonomy-Upgrade-Packages“ von bis zu 15 Jahren möglich scheint. Zudem ist zu beachten, dass die Wartungskosten der Technologie nicht gesondert berücksichtigt

<sup>14</sup> Eine Herleitung und detailliertere Betrachtung der Ergebnisse ist der Masterarbeit „Impact Analysis of Autonomous Trams in Depot“, Abdulghani Al Sabouni; Masterarbeit, Technische Universität Berlin, 12. Oktober 2021. zu entnehmen

werden, sofern diese (perspektivisch) nicht in den Kosten des „Autonomy-Upgrade-Packages“ enthalten sind. Dies ist insbesondere mit dem Umstand zu begründen, dass der Wartungsaufwand und die entsprechenden Kosten zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht belastbar vorherzusagen sind.

Nachfolgend werden demnach eine Bandbreite an Beispielwerten aufgeführt, die vor dem Hintergrund der beschriebenen Einschränkungen zu interpretieren sind und sich in der zukünftigen Praxis zu beweisen haben. Sofern die getroffenen Annahmen jedoch perspektivisch Realität werden, steht den Effizienzgewinnen der Technologie hohe Kosten gegenüber. Im überwiegenden Teil des Annahmenintervalls übersteigen die Kosten die Gewinne (s. Abbildung 50).



**Abbildung 50: Ökonomische Bewertung: Monetäre Technologiekosten vs. monetäre Technologiegewinne**

Somit scheint im Hinblick auf die ökonomische Bilanz der perspektivische Bedarf gegeben, weitere Anwendungen der im Fahrzeug eingebauten Technologie zu schaffen, die zusätzliche monetäre Vorteile generieren. Denkbar ist diesbezüglich beispielsweise das automatisierte Auf- und Abrüsten von Fahrzeugen oder die Anwendung des autonomen Fahrens von Tramfahrzeugen auf ausgewählten Strecken außerhalb des Betriebshofs, die unter Anwendung der im „Autonomy-Upgrade-Packages“ verbauten Komponenten im Fahrzeug zu Teilen bereits technisch realisierbar scheinen. Je mehr der ohnehin verbauten Komponenten für weitere Anwendungen genutzt werden können, desto umfassender kann das ökonomische Potential ausfallen. Diesbezüglich sind jedoch auch weiterführende, wesentlich nicht-technische Herausforderungen, vor allem bezüglich sicherheits- und rechtlicher Aspekte, zu beachten, die es aufbauend auf den Ergebnissen des beschriebenen Projekts separat zu lösen gilt, um das ökonomische Potential zu entfalten.

Es gilt zudem zu beachten, dass in die ökonomische Bewertung lediglich mit quantitativen und gegeneinander gleich gewichteten Faktoren vorgenommen wurde. Sofern weitere Aspekte in die Gesamtbewertung der Technologie einbezogen bzw. höher gewichtet werden, fällt die Bilanz positiver aus. Vor dem Hintergrund des gegenwärtig vorherrschenden Fahrpersonalmangels wäre diesbezüglich etwa die Zahl an eingesparten Arbeitsstunden beim Fahrpersonal relevant und im Rahmen der ökonomischen Bewertung gegebenenfalls höher zu gewichten. Im vorliegenden Fall geht diese Größe lediglich mit den eingesparten Personalkosten in die Bewertung ein. Hierbei wäre jedoch auch ein Bewertungsansatz denkbar, der vor dem Hintergrund des Fahrpersonalmangels jede einzelne eingesparte Arbeitsstunde beim Fahrpersonal besonders gewichtet, um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass diese für den tatsächlichen Fahrdienst frei werden würden und somit dem Mangel entgegengewirkt werden könnte. In diesem Fall würde die ökonomische Bewertung positiver ausfallen.

Unter Berücksichtigung der o.g. Aspekte scheint eine Aussage zur Rentabilität der Technologie gegenwärtig nicht abschließend und belastbar zu treffen. Es bedarf somit aufbauender Forschung und Pilotanwendungen, um gesicherte Vorhersagen zu erhalten, das vorhandene ökonomische Potential umfassender zu ergründen und die Technologie breiter anwendbar und marktreifer zu gestalten.

### AP 4.3: Analyse und Bewertung der rechtlichen Rahmenbedingungen

Im AP 4.3 untersuchte das IKEM die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Genehmigung und den Betrieb einer autonom fahrenden Straßenbahn auf dem Betriebshof. Außerdem wurde über die gesamte Projektlaufzeit eine rechtliche Begleitung gewährleistet und rechtliche Fragenstellungen geklärt. Daraus wurden Lösungsstrategien und -ansätze abgeleitet sowie weitergehende Rechtsfragen für den Betrieb im öffentlichen Straßenraum begutachtet.

Im Jahr 2020 wurden zunächst die grundsätzlichen rechtlichen Anforderungen an den Demobetrieb, insbesondere im Hinblick auf die Vorgaben der BOStrab in einem Gutachten dargestellt. Dabei wurde der Probebetrieb auf der InnoTrans 2020 rechtlich geprüft. Der Schwerpunkt lag hier in der Identifikation der anwendbaren Rechtsvorschriften. Das Gutachten wurde im Konsortium geteilt und die Ergebnisse flossen in die Diskussion um die Ausgestaltung des Vorzugsszenarios ein.

Auf Grundlage der Vorprüfung wurde das erarbeitete Vorzugsszenario rechtlich untersucht. Schwerpunkt waren wieder die technischen und organisatorischen Vorgaben der BOStrab, dazu kam eine Betrachtung der Anforderungen an die Datensicherheit. Das Ergebnis in Form eines Gutachtens wurde ebenfalls im Konsortium besprochen und war wieder Grundlage für den weiteren Austausch sowie für die umfangreiche Analyse der Haftungsrisiken. Damit war die rechtliche Vorprüfung und folglich Meilenstein M1 03/2020 abgeschlossen.

2021 begann das IKEM mit der Erstellung der AStriD-Roadmap „Rechtliche Anforderungen der Umsetzung des AStriD-Konzepts“. Hierbei wurden die rechtlichen Anforderungen umfassend untersucht sowie die Voraussetzungen einer autonom fahrenden Straßenbahn im Demo- und Regelbetrieb geprüft. Neben den sicherheitstechnischen und organisatorischen Regelungen aus der BOStrab wurden auch die Anforderungen beleuchtet, die sich u.a. aus dem Datenschutzrecht, Haftungsrecht und dem Planfeststellungsrecht ergeben. Es wurden rechtliche Hürden herausgearbeitet und Problemstellungen identifiziert. Das Ergebnis wurde im Konsortium geteilt und laufend weiterentwickelt. Die erste Version der rechtlichen Roadmap war erstellt und Meilenstein M2 09/2020 wurde hiermit erfüllt.

Für den Betrieb der autonomen Straßenbahn im Depot wurde in Absprache mit dem Betriebsleiter und der Technischen Aufsichtsbehörde keine Inbetriebnahmegenehmigung gem. § 62 BOStrab beantragt, stattdessen war im Forschungsprojekt der Betrieb „zur Ermittlung der Gebrauchsfähigkeit“ gem. § 62 Abs. 1 S. 1 BOStrab möglich. Zudem wurden die Vorgaben der StVO und datenschutzrechtliche Aspekte der autonomen Straßenbahn für das Betriebsszenario geprüft. Das IKEM unterstützte dabei bei rechtlichen Fragestellungen und sorgte für eine rechtssystematische Begleitung des Prozesses.

Die Vorbereitungen für ein Genehmigungsverfahren im Normalbetrieb wurde vom IKEM durchgehend begleitet. Obwohl im Projekt in Rücksprache mit der TAB keine Genehmigung eingeholt wurde, musste die Technologieentwicklung gleichwohl von Anfang an auf eine für den Regelbetrieb erforderlichen Genehmigung und ihren rechtlichen Anforderungen ausgerichtet werden. Die Fortschritte bei der Weiterentwicklung der Roadmap wurden regelmäßig bei den Jour-Fixe geteilt und rechtliche Fragen von Seiten des Konsortiums beantwortet. Hierbei wurde u.a. auch in einem erstellten Vermerk die Bedeutung des Referentenentwurfs zum autonomen Fahren für Kfz bzgl. des AStriD-Projekts dargestellt und mögliche Parallelen zu Voraussetzungen für autonome Straßenbahnen aufgezeigt.

Die Roadmap wurde um einen Exkurs zu den rechtlichen Anforderungen einer Funkfernsteuerung auf einem generischen Betriebshof ergänzt, da auch technische Überlegungen in diese Richtung im Projekt diskutiert wurden. Es wurden auch Entwicklungspotentiale herausgearbeitet sowie die technische und rechtliche Diskussion im Rahmen des Genehmigungsverfahrens ausgewertet und in die Roadmap eingearbeitet. Durch die Weiterentwicklung der Roadmap wurde Meilenstein M3 03/2021 erreicht.

Ebenfalls wurden Perspektiven und Herausforderungen begutachtet, die sich bei der Umsetzung des AStriD-Konzepts auf der Straße ergeben, also außerhalb des Depots. Dazu wurden die sicherheitstechnischen Voraussetzungen aus der Ausführungsverordnung zum Gesetz zum autonomen Fahren (AFGBV) auf eine autonom fahrende Straßenbahn übertragen und zusammen mit Siemens Handlungsempfehlungen entwickelt,



bei denen erstmalig die konkreten sicherheitstechnischen Vorgaben der AFGBV auf autonome Straßenbahnen übertragen wurden. Dabei wurden die unterschiedlichen Betriebsszenarien nach ihrer Komplexität eingeordnet und dementsprechende technische Anforderungen definiert.

Ein möglicher Lösungsansatz für die Inbetriebnahmegenehmigung einer autonom fahrenden Straßenbahn auf einem generischen Betriebshof im Regelbetrieb, nach den Regeln der BOStrab, wurde in dem Gutachten dargelegt. Zudem wurde eine Workshop-Reihe mit dem Thema „Zulassungsvoraussetzungen einer autonom fahrenden Straßenbahn“ initiiert, bei der ein verbesserter Austausch zwischen Betreiber/Hersteller und den technischen Aufsichtsbehörden angeregt und über mögliche Lösungsansätze für die Inbetriebnahmegenehmigung im Normalbetrieb diskutiert wurde. Der erste Workshop fand am 02.03.2022 statt.

Die rechtlichen Fragestellungen wurden ausgewertet und die Ergebnisse flossen in die finale Version der rechtlichen Roadmap ein. Es wurde eine rechtliche Umsetzungsstrategie für den Regelbetrieb einer autonomen Tram auf dem generischen Betriebshof erarbeitet und gutachterlich anhand der Voraussetzungen der BOStrab in der Roadmap dargelegt. Der Lösungsweg über eine Ausnahmegenehmigung für die autonome Tram wurde in die Roadmap aufgenommen, wobei die rechtlichen Hürden und Risiken klar adressiert wurden. Folglich konnte damit auch der letzte Meilenstein M4 12/2021 erfüllt werden.

Am 29.4.2022 hatte das IKEM die Gelegenheit, das AStriD-Projekt und die Erkenntnisse der rechtlichen Begleitforschung auf der „Bund-Länderbesprechung BOStrab-Themen“ vorzustellen. Dadurch wurde der Austausch mit den Technischen Aufsichtsbehörden der Bundesländer angeregt und der Bedarf eines regelnden Gesetzesrahmens zum autonomen Fahren im Straßenbahnbereich aufgezeigt. Der zweite Workshop „Zulassungsvoraussetzungen einer autonom fahrenden Straßenbahn“ wurde durch das IKEM am 19.5.2022 organisiert und hatte einen weiteren rechtlichen Schwerpunkt. Mit den Stakeholdern wurden unter anderem der Rahmen und die Grenzen eines Betriebs „zur Ermittlung der Gebrauchsfähigkeit“ gem. § 62 Abs. 1 BOStrab diskutiert und der neue Lösungsansatz einer gestuften Inbetriebnahmegenehmigung vorgestellt.

Auf der InnoTrans 2022 stellten Siemens, ViP und das IKEM ihre Projektergebnisse einem interessierten Fachpublikum vor. Dabei wurden auch die rechtlichen Erkenntnisse und Lösungsansätze sowie Handlungsempfehlungen präsentiert.

### Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Ziel der beiden Workshops mit rechtlichen Fokus war es, den Austausch zwischen Entwickler:innen/Forscher:innen auf der einen Seite und den Genehmigungsbehörden von Bund und Land auf der anderen Seite zu initiieren. Dabei sollte die Diskussion zu zukünftigen Genehmigungsverfahren und Zulassungsvoraussetzungen einer autonom fahrenden Straßenbahn im Depot und auf der Straße angeregt werden. Deshalb war es von Bedeutung, neben Forschenden auf dem Gebiet und Mitgliedern des Projektkonsortiums, Entscheidungsträger aus den Landesaufsichtsbehörden (TAB, MIL Brandenburg) und den zuständigen Bundesministerien (BMDV) dafür zu gewinnen. Damit erreichten beide Seiten interessante Einblicke und Synergien und weiterer Austausch konnte initiiert werden.

### AP5: Öffentlichkeitsarbeit

#### Kurzbeschreibung des Arbeitspaketinhalts

Das AP5 zielte auf die Verbreitung der Projektergebnisse an relevante Akteure ab. Zu diesem Zweck wurde in AP5.1 eine begleitende Öffentlichkeitsarbeit – Vorträge, Veröffentlichungen, Live-Demonstrationen – sowie in AP5.2 eine Abschlusskonferenz durchgeführt.

#### Darstellung der Ergebnisse

##### Begleitende Öffentlichkeitsarbeit

Im Laufe des Projektes wurden zahlreiche Vorträge auf Fachtagungen und Konferenzen gehalten sowie Fachartikel veröffentlicht. Details sind dem Schlusskapitel zu entnehmen.

Über die gesamte Projektlaufzeit wurden auch Delegation aus dem In- und Ausland durch ViP Potsdam und Siemens Mobility im Betriebshof empfangen und anhand einer Live-Demonstration der ausgewählten automatisierten Depot-Prozesse (Aufrüsten – Bereitstellen – Besandung – Waschanlage – Abstellen – Abrüsten) über das Projekt informiert. Folgende sind beispielhaft zu nennen:

- Teamtag des Oberbürgermeisters von Potsdam am 10. August 2021
- Pressetermin „Siemens Mobility und Kooperationspartner ViP präsentieren Forschungsprojekt Autonome Straßenbahn im Depot“ – Erfolgreiche Demonstration eines vollautomatisierten Straßenbahndepots mit autonom fahrender Tram, 23. August 2021; Teilnehmer: lokale, nationale und internationale Pressevertreter, Oberbürgermeister von Potsdam, BMDV, u.v.a.; infolgedessen entsprechende Berichterstattung in Tages- und Fach-Presse
- Besuch Delegation Urban Development Corporation of Trinidad and Tobago Limited in Begleitung des VDV am 18. November 2021
- Besuch Guido Beermann, Minister für Infrastruktur und Landesplanung des Landes Brandenburg am 10. August 2022
- Besuch Dr. Benjamin Grimm, Staatssekretär in der Staatskanzlei des Landes Brandenburg am 4. August 2022
- Besuch Delegation des Verkehrsausschusses des dänischen Parlamentes am 13. September 2022
- Fachmesse InnoTrans 2022, 20.-22. September 2022 mit jeweils 3 bis 4 Demonstrations-Terminen für interessierte Fachbesucher der Messe (Transfer von und zu Messegelände), Teilnehmer hauptsächlich von Betreibern u.a. aus Deutschland, Schweiz, Skandinavien, Spanien, USA
- Besuch Delegation des spanischen Verkehrsministeriums am 22. November 2022

### **AP5.2: Durchführung einer Abschlusskonferenz**

Zur umfassenden Verbreitung der Projektinhalte, bestand die Herausforderung in der Durchführung der Arbeiten im AP 5.2 alle relevanten Akteure auszuwählen und einzuladen. Diesbezüglich sind vor allem zunächst Vertreter des Fördergebers und des Konsortiums zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind als Stakeholder des Verkehrsbetriebes Potsdam der Eigentümer in Form der Landeshauptstadt Potsdam sowie die zuständigen Aufsichtsbehörden einzubeziehen, hier in Form des Ministeriums für Infrastruktur und Landesplanung (MIL) sowie des Eisenbahn-Bundesamtes. Ebenso zu berücksichtigen ist der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) als Interessenvertretung der Branche und hier insbesondere die Arbeitsgruppe zur Erarbeitung einer VDV-Schrift zum automatisierten Betriebshof. Darüber hinaus wurden dem Konsortium bekannte interessierte Vertreter von Verkehrsunternehmen und politischen Institutionen berücksichtigt.

Um eine möglichst umfassende Teilnahme an der Veranstaltung zu ermöglichen, wurde diese hybrid durchgeführt, das heißt neben der Teilnahme in Präsenz war auch die Zuschaltung via Microsoft Teams möglich. Da die Räumlichkeiten der ViP nicht für die erwartete Teilnehmerzahl (ca. 30 Personen) ausreichend sind, wurde auf einen externen Besprechungsraum zurückgegriffen (NH-Hotel in Potsdam, Friedrich-Ebert-Straße).

Zudem wurde ein Vortragsprogramm vorbereitet, in dem alle Konsortiumsmitglieder ihre Arbeitspakete und die erzielten Ergebnisse vorstellten.

Darüber sollte den in Präsenz anwesenden Teilnehmern noch einmal die Möglichkeit gegeben werden, die Arbeitsergebnisse in einer Live-Demonstration zu erleben. Hierzu wurden die Teilnehmer durch ViP mit einer Sonderbahn zum Betriebshof gebracht und mit dem für die Versuche umgebauten Combino 400 hier die zuvor in der Theorie erläuterten folgenden Szenarien demonstriert:

- Ferneinschaltung des Fahrzeugs
- Autonome Fahrt vom Stellplatz in der Abstellhalle zum Bereitstellungspunkt auf Gleis 44
- Autonome Fahrt von Gleis 44 zur Besandungsanlage
- Count down des Besandungsvorgangs
- Autonome Fahrt von der Besandung zum Waschen
- Automatische Fahrzeugwäsche
- Autonome Fahrt von der Waschanlage auf Gleis 44
- Autonome Fahrt von Gleis 44 in die Abstellhalle
- Ferngesteuertes Abschalten des Fahrzeugs

Im Anschluss an die Demonstration erfolgte eine interne Nachbesprechung, zu der über Microsoft Teams der Fördergeber und Projektträger zugeschaltet war. Diese diente der Durchsprache der Konferenzinhalte, der Klärung offener Fragen sowie der Vorschau auf den Schlussbericht.

An der Abschlusskonferenz haben insgesamt 33 Personen teilgenommen.

## **AP6: Projektmanagement**

### **Kurzbeschreibung des Arbeitspaketinhalts**

Das AP6 zielte auf die Sicherstellung der Erreichung der Projektziele unter Einhaltung des Zeit- und Kostenrahmens ab.

### **Darstellung der Ergebnisse**

Im AP6 wurde über die gesamte Projektlaufzeit hinweg, die Koordination des Gesamtprojekts in fachlicher sowie administrativer Hinsicht einschließlich der Unterstützung bei Dokumentation, der Terminplanung und des projektbegleitenden Projektmanagement/-controlling durchgeführt. Weiterhin wurden regelmäßige Abstimmungen in Form eines i.d.R. zweiwöchentlichen Jour-Fixe zwischen den Partnern eingerichtet, zentrale Dokumentations- und Ablagestrukturen erstellt und der Austausch mit dem Projektträger gepflegt. Zudem wurde ein kontinuierliches Risikomanagement durchgeführt, das etwaige Probleme frühzeitig identifiziert, berücksichtigt und diesen gezielt entgegengewirkt hat. Somit konnte insgesamt ein reibungsloser und effizienter Projektablauf erreicht werden.

## Nutzen, Verwertbarkeit und allgemeine Übertragbarkeit

### Daten in der mCLOUD

In der mCLOUD (bzw. der Mobiltheke als Nachfolgerin) werden folgende im Projekt erfasste Datensätze bereitgestellt:

- Digitale Karten mit Schienen- und Streckengeometrie, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Positionen von Signalen, Streckentrennern und Warnzonen (<https://mobiltheke.info/offers/-2231882204590514668>)
- Data Hub Daten mit Telemetriedaten aus der Fahrzeugsteuerung und der Mobilfunkabdeckung (<https://mobiltheke.info/offers/-4977240150605192009>)

Diese können zur Analyse und Optimierung von Prozessen in Straßenbahndepots (z.B. Verringerung der Standzeiten von Fahrzeugen mithilfe von Predictive Maintenance) genutzt oder im Rahmen von weiteren „Smart City“ Anwendungen aufgegriffen werden (z.B. Identifizierung von Gefahrenstellen für die Verkehrsplanung oder Erstellung von Fahrprofilen zur Förderung von energiesparendem Fahrverhalten). Um in diesem Rahmen die Markt- und Einsatzfähigkeit der Telemetriedatenerfassung zu bewerten, werden aktuell Interviews mit Verkehrsbetrieben geführt.

### Übertragung der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse auf andere Schienenfahrzeuge

Das Projekt AStriD hat mit seinen Ergebnissen aus der konkreten Anwendung für Straßenbahnen auch die Basis für die Übertragung auf andere Schienenfahrzeug-Klassen gelegt:

#### Regionalzüge/S-Bahnen:

- Automated Train: Förderprojekt in der Beantragung im Förderprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ (BMWK). Ziel ist die Erarbeitung und Demonstration der wesentlichen technologische Lösungsansätze für die Umsetzung des vollautomatisierten Fahrens auf der Schiene (ATO GoA4). Im Fokus stehen drei Aspekte: erstens die Erhebung der betrieblichen Anforderungen aus dem Bahnsektor an vollautomatisiertes Fahren; zweitens, daraus abgeleitet die Erstellung einer Systemarchitektur für ein vollautomatisiertes Fahrzeug unter konsequenter Einbeziehung von Zulassungsfragen; und drittens die Umsetzung und Integration gemeinsam erarbeiteter technischer Lösungen u.a. auf einen Regional-Zug von Siemens Mobility. Für alle drei Aspekte werden die AStriD-Ergebnisse genutzt.

#### Fernverkehr:

- Erste Ausschreibung für autonomen Betrieb im Depot bei DB Fernverkehr – fahrerloses Fahren wird im neuen Fahrzeugkonzept „Hochgeschwindigkeit HGV 3.0“ gefordert
  - o Nachweis der technischen Machbarkeit bei durch AStriD bei DB geliefert
  - o AStriD-Erfahrungen fließen durch die Experten von Siemens Mobility ein
  - o Ausschreibung ist geplant für Ende 2023, Lieferung ab 2030
- Siemens/DB Fernverkehr prüft die Ausrüstung der aktuellen ICE4 Flotte mit AStriD-Funktionalitäten (vollautomatisiertes Ab- und Bereitstellen und Bewegen der Fahrzeuge)

#### Lokomotiven/Güterverkehr:

- Erprobung von Automatic Train Operation Technologies for Cargo: Förderprojekt des BMDV im Rahmen des Bundesprogramms "Zukunft Schienengüterverkehr". Dabei sollen bis Ende 2025 zum ersten Mal die Steuerung und Fernüberwachung automatisierter Züge im Schienengüterverkehr auf freier Strecke auf dem niederländischen Abschnitt der Betuweroute erprobt und getestet werden. Siemens Mobility bewirbt sich derzeit als Kooperationspartner für die Bereitstellung der sensorbasierten Hinderniserkennung, und kann hierbei auf die im Rahmen von AStriD gewonnenen Erkenntnisse und getesteten Technologien aufbauen.

## Verwendung der Projektergebnisse in weiteren Folgeprojekten

Seit Projektbeginn werden die Ergebnisse laufend in parallellaufende Forschungsprojekte auf nationaler und EU-Ebene eingespeist:

- Berliner Digitaler Bahnbetrieb BerDiba: Förderprojekt des Landes Berlin im Rahmen des Technologie- und Innovationsförderprogramms ProFIT für die anwendungsbezogene Forschung im Bereich Digitaler Bahnbetrieb. Dort werden neuartige Technologien für automatisiertes Fahren auf der Schiene unter realen Betriebsbedingungen erforscht und erprobt, mit dem Schwerpunkt Umfeldwahrnehmung und Hinderniserkennung mittels künstlicher Intelligenz und hochleistungsfähigen Sensorsystemen zur Umfeldwahrnehmung auf und im Zug. Die Erprobung ist bei S-Bahn Berlin geplant, Laufzeit bis 2024. Verwendung der AStriD-Ergebnisse zu Sensorik, Lokalisierung und Objekterkennungs-Algorithmik.
- Safe.trAIn: Förderprojekt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen des Fachprogramms „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“. Basierend auf den Anforderungen an die Sicherheitsnachweisführung des Schienenverkehrs werden Prüfmethode und –werkzeuge für KI-basierte Methoden für den Einsatz in einem fahrerlosen Regionalzug entwickelt und anschließend in einem virtuellen Testfeld validiert und verifiziert. Der Fokus hierbei liegt auf KI basierten Funktionen für die Objekterkennung, Laufzeit 2022-2025. Verwendung der AStriD-Erfahrungen zum KI-Anteil der Objekterkennungs-Algorithmik
- ERJU – Europe’s Rail Joint Undertaking: Europäisches Forschungsprogramm für Schienenverkehr, fördert die Digitalisierung und Automatisierung, um die Kosten für die Eisenbahnindustrie zu senken, die Kapazität zu erhöhen und Flexibilität und Zuverlässigkeit zu stärken, Start ab 2023. AStriD-Ergebnisse fließen in die Normungs- und Standardisierungs-Aktivitäten ein.

## Kommerzielles Potential des autonomen Fahrens im Schienenverkehr sowie Beitrag der Projektergebnisse zur eigenen Marktposition in diesem Bereich

Gemäß der aktuellen Implementierungs-Roadmap plant Siemens Mobility, seine derzeit in der Entwicklung befindlichen Lösungen für das autonome Fahren im Schienenfahrzeugbereich in mehrere Leistungsstufen einzuführen, und damit die jeweils damit verbundenen spezifischen Kundennutzen zu adressieren:

- Assistenzsystem – Hauptnutzen: Weniger Kollisionen und dadurch Erhöhung der Verfügbarkeit durch weniger Ausfallzeiten, sowie Senkung der Kosten für Unfall-Reparaturen
- Fahrerloses Fahren (GoA4) im Depot (angebotsfähig ab 2026) – Hauptnutzen: Effizienzgewinne im Depot (Zeit, Durchsatz, Verfügbarkeit), Kostensenkung durch Einsparung von Fahr- und Rangierpersonal, Lösung des Problems des immer akuter werdenden Fachkräftemangels (die wenigen Fahrer werden für den Passagierbetrieb benötigt)
- Fahrerloses Fahren (GoA4) auf geeigneten Teilstrecken (angebotsfähig tbd., abhängig von der Entwicklung der Zulassungsgrundlagen und der Gesetzeslage) – Hauptnutzen: Kostensenkung durch Vermeidung von Kollisionen, Kostensenkung durch Einsparung von Fahrpersonal, Lösung des Problems des Fachkräftemangels
- Fahrerloses Fahren (GoA4) auf der Strecke (angebotsfähig tbd., abhängig von der Entwicklung der Zulassungsgrundlagen und der Gesetzeslage) – Hauptnutzen: Erhöhung der Kapazität auf der Schiene, Höhere Einnahmen durch mehr Fahrgästen durch stabilen und eng getakteten Betrieb und Betrieb nach Bedarf, mehr Fahrzeugkapazität, Enabler für neue Betriebsmodelle (nachfragebasierter Betrieb mit Kleinheiten), Kostensenkung durch Vermeidung von Kollisionen, Kostensenkung durch Einsparung von Fahrpersonal, Lösung des Problems des Fachkräftemangels

Den Hauptzielmarkt stellt aufgrund der dortigen hohen Personalkosten und damit dem höchsten Attraktivitätsgrad, Europa dar, mit den Schwerpunktländern Skandinavien (Nachfrage bereits heute vorhanden), UK und Deutschland (Starkes Interesse, wachsende Nachfrage).

Hierbei wird für das kommerzielle Potential nicht nur das in AStriD behandelte Tram-Segment, sondern alle im Siemens-Portfolio befindlichen Fahrzeug-Klassen betrachtet:

- Tram



- Metro
- Mainline
  - o Regionalzüge und S-Bahnen (Business case noch in Diskussion)
  - o Lokomotiven
  - o Hochgeschwindigkeitszüge (Business case noch in diskussion)

Für Siemens stellt sich somit ein entsprechend hohes wirtschaftliches Potential dar, unter der Annahme, dass

- in Neufahrzeugausschreibungen grundsätzlich Züge mit mindestens einem Assistenzsystem, nachgefragt werden
- in Neufahrzeugausschreibungen zunehmend modulare Systeme nachgefragt werden, die gemäß der o.g. Leistungsstufen sukzessive hochgerüstet werden können, sobald die nächsthöhere Stufe marktfähig verfügbar ist
- von Siemens bzw. Wettbewerbern ausgelieferte Fahrzeuge nachgerüstet werden können

Da kleinere Wettbewerber ADAS Systeme nicht selbst entwickeln können und diese deshalb für Neufahrzeuge/Nachrüstung von Siemens beziehen, hat das AStriD-Projekt einen wesentlichen Beitrag geleistet, die Realisierung der Leistungsstufen zu beschleunigen und damit die genannten Potentiale deutlich schneller zu heben.

Die im Rahmen des Projekts erarbeitete, automatisiert erstellte digitale Karte sowie die Algorithmen für maschinelles Bildverstehen ist weiter zu optimieren und für zukünftige Anwendungsfälle zu abstrahieren.

Wie erwähnt ist die hochgenaue Lokalisierung auf Basis einer digitalen Karte ein zentrales Element des autonomen Fahrens im Schienenfahrzeugbereich. Daher stellen die im Rahmen des AStriD-Projektes erzielten Ergebnisse der Kartenentwicklung für Siemens Mobility die Grundlage für die derzeit laufende Entwicklung der entsprechenden Anwendungsfälle des autonomen Fahrens im Nah- und Fernverkehr dar.

### Fazit und Ausblick

Der nächste logische Schritt, welcher sich auch aus den rechtlichen Workshops ableitet, ist die systematische Zulassung des Gesamtgewerkes der Depotautomatisierung, mit dem Schwerpunkt auf die sicherheitsrelevanten Komponenten (ADAS-System mit sicherer Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung). Ziel dieser Musterzulassung ist die Definition der Anforderung an Technologie und Zulassung-/ Nachweisführung zum Nachweis der Sicherheit und damit der Schaffung der Voraussetzung einer kommerziellen Nutzbarkeit.

Die Projektpartner haben sich hierzu bereits ausgetauscht und erste Projektideen gesammelt.

## Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

---

Die Projektziele und Meilensteine konnten mit dem ursprünglich vorgesehenen Arbeitsaufwand erreicht werden. Die geleistete Arbeit war zur Erreichung der Ziele und Meilensteine notwendig und angemessen.

Aufgrund der vorherrschenden pandemischen Lage im Projektzeitraum war jedoch eine Verlängerung der Projektlaufzeit notwendig. Insbesondere die technische Realisierbarkeit war aufgrund der situativen Folgewirkungen und Auflagen erschwert. Durch die Ausdehnung der Laufzeit um drei Monate auf das Projektdatum am 31.12.2022 konnten alle Arbeiten erfolgreich durchgeführt werden.

Im Laufe des Projekts haben sich zudem neue Erfordernisse in Hinblick auf die Automatisierung des Depots ergeben. Es wurde evaluiert und beschlossen, dass die Einbindung der Waschanlage in die automatischen Servicefahrten eine sinnvolle Erweiterung darstellt. Dazu wurde der Schaltschrank mit zusätzlicher Hardware ausgestattet und die Steuerung durch den Hersteller der Waschanlage erweitert. Der Umfang des Personalaufwands hat sich dabei aber nicht grundlegend erhöht, wie auch im nächsten Abschnitt ersichtlich ist.

## Wichtigste Punkte des zahlenmäßigen Nachweises

---

Aufgrund des Ausscheidens des Projektpartners Mapillary wurden die noch ausstehenden Arbeiten durch die Projektpartner Siemens und KIT übernommen. Dadurch ergaben sich Aufstockungen der Mittel bei diesen Partnern, welche in separaten Aufstockungsanträgen genehmigt wurden.

Zudem war aufgrund der im Projektzeitraum vorherrschenden Lage eine Verlängerung der Projektlaufzeit bis 31.12.2022 notwendig. In diesem Zusammenhang sind jedoch keine zusätzlichen Kosten entstanden.

Die höchsten Ausgaben entfielen auf Personalkosten, alle weiteren Kostenpositionen und die über die gesamte Projektlaufzeit angefallenen Kosten in den einzelnen Positionen können dem je Projektpartner gesondert eingereichten Verwendungsnachweis entnommen werden.

Darüber hinaus gab es geringfügige Umwidmungen hinsichtlich der Verwendung der finanziellen Mittel. In den Projektaktivitäten im Zusammenhang mit der Livebildübertragung des Remote-Fahrers (Erforschung der digitalen Karte) sind Mehraufwände bei Siemens gegenüber der initialen Planung identifiziert worden. Bei Codewerk wurde ein Teil der Personalkosten für die Anbindung der Waschanlage umgewidmet. Außerdem wurde nach Aufforderung des Projektträgers ein Kürzungsantrag eingereicht, da die ursprünglich beantragten Mittel nicht vollständig ausgeschöpft werden konnten.

Es konnten jedoch auch Kosten eingespart werden: Die ursprünglich für die Erreichung der Projektziele geplanten Kosten für die Anschaffung von Materialien und Sachmitteln konnten aufgrund der Verwendung von bereits im Bestand der Siemens Mobility befindlichen Materialien und Sachmitteln eingespart werden, da diese sich für die Umsetzung der Projektziele in AStriD als zweckdienlich und ausreichend erwiesen haben.

Die in dieser Form bewilligten Mittel wurden eingehalten, plangemäß abgerufen und zweckentsprechend verbraucht.

## Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Durchführung des Vorhabens

---

Da der Datenaustausch zwischen Fahrzeug- und Landseite eine immer größere Rolle spielt, wurden während der Projektlaufzeit zunehmend Plattformen entwickelt, die ähnlich wie der Data Hub als eine zentrale Datendrehscheibe fungieren. Diese stehen sogar zum Teil bereits kommerziell zur Verfügung (z.B. DB mobile Integrationsplattform und CI4Rail Edge Computing Platform). Eine besondere Herausforderung war im AStriD Projekt die Integration bestehender Systeme und Schnittstellen zum automatisierten Fahrbetrieb, was mit dem Data Hub gelungen ist und ihn auch von den genannten Systemen abgrenzt. Aktuell mangelt es noch an einigen Rahmenbedingungen, die eine standardisierte Vorgehensweise bei der Ausarbeitung dieser Systeme erlauben. Allerdings wird vom VDV derzeit eine Standardisierung der Fahrzeug-Land-Kommunikation in VDV-Schrift 435 angestrebt. Auch der wirtschaftliche Nutzen ist für viele Anwendungsfälle noch nicht klar.

Die vorhabensspezifische Entwicklungs- und Forschungslandschaft wurde durch die Projektpartner sowohl national als auch international während der gesamten Projektlaufzeit evaluiert und ausgewertet. Weitere Fortschritte als die oben genannten sind den Projektpartnern nicht bekannt.

## Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

### Codewerk GmbH

- Pressetermin „Siemens Mobility und Kooperationspartner ViP präsentieren Forschungsprojekt Autonome Straßenbahn im Depot“ – Erfolgreiche Demonstration eines vollautomatisierten Straßenbahndepots mit autonom fahrender Tram, 23. August 2021, Potsdam; Teilnehmer: lokale, nationale und internationale Pressevertreter, Oberbürgermeister von Potsdam, BMDV, u.v.a.; infolgedessen entsprechende Berichterstattung in Tages- und Fach-Presse
- Präsentation des AStriD Projekts am Stand des BMDV/mFUND auf der IT-Trans (Internationale Konferenz und Fachmesse für intelligente Lösungen im öffentlichen Personenverkehr), 10.-12.05.2022, Karlsruhe
- Veröffentlichung von Karten- und Fahrzeugdaten in der mCLOUD/mobilithek (vgl. Nutzen, Verwertbarkeit und allgemeine Übertragbarkeit)
- Teilnahme und Unterstützung bei weiteren Demonstrationen auf dem ViP Betriebshof (siehe Siemens und ViP)

### Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität (IKEM)

- „Impact Analysis of Autonomous Trams in Depot“, Abdulghani Al Sabouni; Masterarbeit, Technische Universität Berlin, 12. Oktober 2021.
- „Autonome Straßenbahn im Depot – Der nächste Meilenstein auf dem Weg zum autonomen Fahren“, Al Sabouni, Abdulghani; Kallmeyer, Friedemann; Plass, Timon, Vortrag, InnoTrans 2022 Speakers Corner
- „Ergebnisse der rechtlichen Begleitforschung im AStriD-Projekt“ auf der Bund-Länderbesprechung BOStrab-Themen, Timon Plass, 29. April 2022
- „Zulassungsvoraussetzungen einer autonom fahrenden Straßenbahn“, Online-Workshop mit Stakeholdern, 2.03.2022 und 19.05.2022, Timon Plass
- „Vom Betriebshof auf die Straße – Herausforderungen und Chancen der Automatisierung im Betriebshof“, mFund Konferenz, 2. Oktober 2021, Timon Plass; Nathalie Brenner

### Siemens Mobility GmbH

- „Teaching Trams to Drive – die Entwicklung vom assistierten zum autonomen Fahren“, Daniel Hoepffner; Matthias Hofmann, Vortrag, Forum Neue Mobilitätsformen Technischen Hochschule Wildau, 12. März 2020, Online-Veröffentlichung nach Corona-bedingter Absage der Veranstaltung
- „Autonome Straßenbahn im Depot – AStriD (mFUND Projekt des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur – BMVI)“, Daniel Hoepffner; Matthias Hofmann, Vortrag, Breidenbach + Frost-Fachtagung „Auf dem Weg zum automatisierten und autonomen Betriebshof“, 08./09. Oktober 2020, Berlin
- „Siemens Mobility und ViP Potsdam. Auf dem Weg zur autonomen Tram“, Matthias Hofmann, Fachartikel, bahn manager – Das Wirtschaftsmagazin für den Schienensektor, Sonderausgabe „Alternative Antriebe & Autonomes Fahren“ 2020
- „Trams das Fahren lehren – Auf dem Weg zur smarten, autonomen Straßenbahn“, Matthias Hofmann, Fachartikel, Der Nahverkehr, Ausgabe 12/2020
- „Der nächste Meilenstein auf dem Weg zum autonomen Fahren; Das Forschungsprojekt AStriD – Autonome Straßenbahn im Depot“, Matthias Hofmann, Vortrag, VDV-Webinar „Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren bei Straßenbahnen (FAST)“, 10. September 2021, Online
- „Der nächste Meilenstein auf dem Weg zum autonomen Fahren; Das Forschungsprojekt AStriD – Autonome Straßenbahn im Depot“, Matthias Hofmann, Vortrag, CNA Forum Bahntechnik Bayern, 24. März 2022, Nürnberg
- „Der automatisierte Betriebshof mit autonom fahrenden Schienenfahrzeugen – Praxisbericht aus dem mFund Projekt AStriD“, Daniel Hoepffner; Matthias Hofmann, Vortrag und Live-Demonstration, Breidenbach + Frost-Fachtagung „Der automatisierte Betriebshof und Betriebshof-Managementsysteme im praktischen Einsatz“, 12./13. Mai 2022, Potsdam



- „AStriD – Der nächste Meilenstein auf dem Weg zum autonomen Fahren“, Matthias Hofmann, Vortrag, 6. VDV-Zukunftskongress Autonomes Fahren im öffentlichen Verkehr, 24./25. Mai 2022, München
- „AStriD – Der nächste Meilenstein auf dem Weg zum autonomen Fahren“, Daniel Hoepffner; Matthias Hofmann, Vortrag und Live-Demonstration, Siemens Mobility Instandhaltungstage, 21. Juni 2022, Potsdam
- “Next stop: depot, Teaching trams to drive”, Julia Fischer; Marcel Heming, Virtual Event der Siemens Mobility GmbH anlässlich des Pressetermins zur Vor-Ort-Demonstration des Projektes, 25. August 2021
- “AStriD – The next milestone towards autonomous driving”, Andreas Irmisch, Vortrag, UITP Regional and Suburban Rail Committee Meeting, 20. Oktober 2022, Oslo
- „Autonome Straßenbahn im Depot – Der nächste Meilenstein auf dem Weg zum autonomen Fahren“, Matthias Hofmann, Vortrag, InnoTrans 2022 Speakers Corner, 23. September 2022, Berlin
- „Der autonome Betriebshof – Erfahrungsbericht aus dem mFund Projekt AStriD“, Daniel Hoepffner; Matthias Hofmann, Vortrag, Breidenbach + Frost-Fachtagung „Der automatisierte Betriebshof als Grundlage des automatisierten Schienenverkehrs“, 17./18. November 2022, Darmstadt
- Über die gesamte Projektlaufzeit als fester Tagesordnungspunkt: Berichterstattung und Diskussion über Fortschritt und Ergebnisse im Rahmen des halbjährlich stattfindenden Arbeitskreises „FAST – Fahrerassistenzsysteme“ des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen VDV

### Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

- Teilnahme am mFUND-Fach Austausch Schienenverkehr, Nicole Rossel, 07. Juli 2020
- „Overview of current initiatives for AV research and long term trends“, Nicole Rossel; Eric Sax, Vortrag, UITP Research in Mobility Committee Meeting, 12 Oktober 2020, Online
- „Vom Betriebshof auf die Straße – Herausforderungen und Chancen der Automatisierung im Betriebshof“, Nicole Rossel; Eric Sax; David Stegmaier, Vortrag, Vorstellung im Arbeitskreis „FAST – Fahrerassistenzsysteme“ des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen VDV, 4. November 2020, Online
- „Automated vehicle depots as initial step for automated public transportation“, Nicole Rossel, Vortrag, UITP IT-Trans2020, 01.- 03. Dezember 2020, Online
- „Automatisierungspotentiale im ÖPNV – Am konkreten Beispiel eines Straßenbahndepots“, Eric Sax; Nicole Rossel, Zeitschriftenartikel; Verkehr und Technik (V+T), Ausgabe 1/2021
- „Technical approaches for automated maintenance in daily operation of city buses“, Nathalie Brenner; Nicole Rossel, Vortrag, UITP-Training Bus Maintenance, 27. Juli 2021, Online Course
- „Vom Betriebshof auf die Straße – Herausforderungen und Chancen der Automatisierung im Betriebshof“, Timon Plass; Nathalie Brenner, Vortrag, mFund Konferenz, 2. Oktober 2021, Online
- „Automation Potential in Public Transport based on a Depot Model“, Nathalie Brenner; Nicole Rossel, Eric Sax, Paper & Poster & Vortrag, 8th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS 2022), 27.-29. April 2022, Online
- „Overview of current initiatives in Automated Public Transport in our Research Group“, Nicole Rossel; Eric Sax, Vortrag, UITP Research in Mobility Committee Meeting, 09. Mai 2022, Karlsruhe
- „Autonome Straßenbahn im Depot – Der nächste Meilenstein auf dem Weg zum autonomen Fahren“, Nicole Kechler, Vortrag, InnoTrans 2022 Speakers Corner, 23. September 2022, Berlin

### ViP Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH

#### Vorträge bei externen Veranstaltungen und Konferenzen

- Live-Demonstration, Siemens Mobility Instandhaltungstage, 21. Juni 2022, Potsdam
- Live-Demonstration, Breidenbach + Frost-Fachtagung „Der automatisierte Betriebshof und Betriebshof-Managementsysteme im praktischen Einsatz“, 12./13. Mai 2022, Potsdam, Ivo Köhler
- „Autonome Straßenbahn im Depot – Der nächste Meilenstein auf dem Weg zum autonomen Fahren“, Vortrag, InnoTrans 2022 Speakers Corner, 23. September 2022, Berlin, Ivo Köhler

- Clusterveranstaltung des Clusters Verkehr, Mobilität und Logistik der Wirtschaftsförderung Land Brandenburg GmbH: „Neue Mobilitätsökosysteme: Autonom und vernetzt im urbanen und ländlichen Raum“ am 27. September 2022, online, Ivo Köhler.
- Abschlusskonferenz Projekt ASTriD am 8. Februar 2023 in Potsdam.

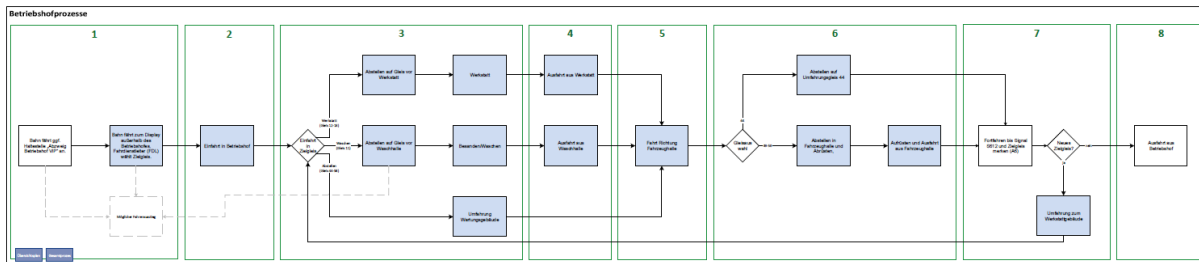
### Projektvorstellungen mit Praxis-Demonstration für Besuchsdelegationen im Betriebshof der ViP Potsdam

- Teamtage des Oberbürgermeisters von Potsdam am 10. August 2021
- Pressetermin „Siemens Mobility und Kooperationspartner ViP präsentieren Forschungsprojekt Autonome Straßenbahn im Depot“ – Erfolgreiche Demonstration eines vollautomatisierten Straßenbahndepots mit autonom fahrender Tram, 23. August 2021; Teilnehmer: lokale, nationale und internationale Pressevertreter, Oberbürgermeister von Potsdam, BMDV, u.v.a.; infolgedessen entsprechende Berichterstattung in Tages- und Fach-Presse
- Besuch Delegation Urban Development Corporation of Trinidad and Tobago Limited in Begleitung des VDV am 18. November 2021
- Besuch Dr. Benjamin Grimm, Staatssekretär in der Staatskanzlei des Landes Brandenburg am 4. August 2022
- Besuch Guido Beermann, Minister für Infrastruktur und Landesplanung des Landes Brandenburg am 10. August 2022
- Besuch Delegation des Verkehrsausschusses des dänischen Parlamentes am 13. September 2022
- InnoTrans 2022, 20.-22. September 2022 mit jeweils 3 bis 4 Demonstrations-Terminen für interessierte Fachbesucher der Messe (Transfer von und zu Messegelände), Teilnehmer hauptsächlich von Betreibern u.a. aus Deutschland, Schweiz, Skandinavien, Spanien, USA
- Besuch Delegation des spanischen Verkehrsministeriums am 22. November 2022

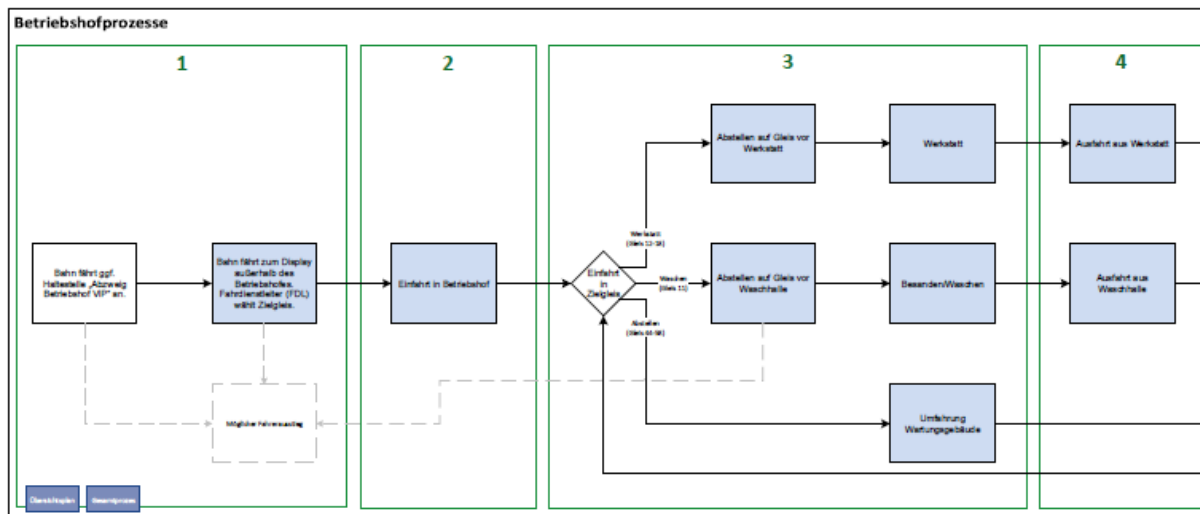
### Gremienarbeit

- Mitarbeit im VDV-Arbeitskreis zur Erarbeitung des Entwurfs der VDV-Schrift 890 Automatisierter Betriebshof, Präsenztermine in Stuttgart am 5. März 2020 und 4. August 2021, Onlinebesprechungen am 22. Juli 2020, 16. September 2020, 16. November 2020, 25. Februar 2021, 11. Mai 2021, 22. Juni 2021, Umfrageverfahren am 7. März 2023 veröffentlicht.

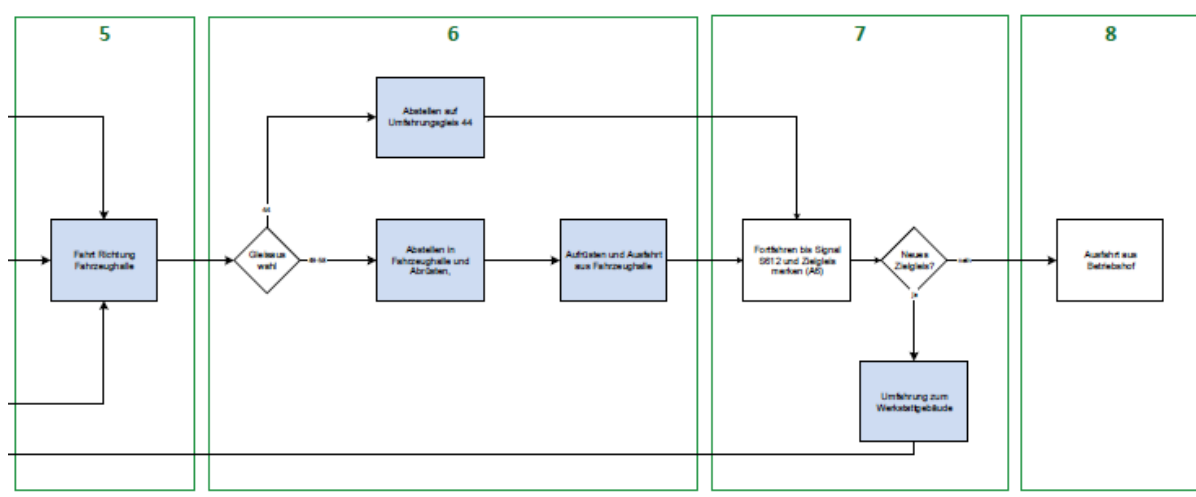
# Anhang



Anhang 1: Überblick über gesamten Prozessablauf der Betriebsbereitmachung auf dem Betriebsbahnhof Potsdam



Anhang 2: Überblick über Teil 1 des Prozessablauf der Betriebsbereitmachung auf dem Betriebsbahnhof Potsdam



Anhang 3: Überblick über Teil 2 des Prozessablauf der Betriebsbereitmachung auf dem Betriebsbahnhof Potsdam

**Anhang 4:****Ergebniszusammenfassung der Expert\*innenbefragung aus AP 4.2**

1. Zwei von drei Befragten sind der Meinung, dass die genannte Liste der Prozesse im Depot unvollständig ist. Die fehlenden Prozesse sind ihrer Meinung nach die regelmäßige Innenreinigung, regelmäßige kleinere Reparaturen wie das Auswechseln von Schleifstreifen, Rangierfahrten, Testfahrten und Überführungsfahrten von beschädigten Zügen. Obwohl den Autoren der Umfrage diese zusätzlichen Vorgänge bekannt sind, wurden sie aus der AStriD-Analyse ausgeschlossen, da keine Rohdaten zur Verfügung standen, um zu wissen, wie oft sie jährlich anfallen. Nach Angaben der Betriebshofleitung handelt es sich dabei nicht um "geplante" Vorgänge, sondern um solche, die nach Bedarf stattfinden, weshalb die Schwankungsbreite sehr hoch ist. Außerdem wird dadurch bestätigt, dass keine weiteren Vorgänge in den Straßenbahndepots übersehen wurden und alle Vorgänge bekannt sind.
2. Die Befragten glauben, dass das Servicepersonal und das Betriebshofmanagement eine große Rolle in zukünftigen automatisierten Straßenbahndepots spielen werden, während die Straßenbahnfahrer überflüssig werden. Die Auswirkungen auf das Werkstattpersonal werden mehr oder weniger die gleichen bleiben. Diese Ergebnisse gehen Hand in Hand mit den Schlussfolgerungen aus der AStriD-Analyse. Die Befragten gehen davon aus, dass in zukünftigen automatisierten Straßenbahndepots zusätzliches Personal für die Systemwartung und andere system- und technikbezogene Tätigkeiten benötigt wird. Dies ist auch eine Schlussfolgerung aus AStriD, allerdings ist unklar, wie viel zusätzliches Personal erforderlich sein wird und was genau seine Aufgaben sein werden, daher ist eine Quantifizierung derzeit nicht möglich.
3. Zwei von drei Befragten glauben, dass die künftigen Investitionskosten für Bahnbetriebswerke autonome und automatisierte Lösungen einschließen werden. Sie alle glauben, dass autonome, marktreife Lösungen bald kommerziell verfügbar sein werden. Dies lässt sich auch durch die EU-Investitionen in autonome Technologien und die derzeit laufenden Strategien für den Übergang zur Mobilität belegen.
4. Zwei von drei Befragten glauben, dass automatische Straßenbahndepots die Betriebskosten insgesamt erhöhen werden. Alle drei Befragten haben die Ergebnisse der wirtschaftlichen Analyse als niedrig eingestuft und glauben, dass der wirtschaftliche Nutzen nicht so hoch sein wird, wie derzeit berechnet. Dies liegt daran, dass sie glauben, dass es viele versteckte Kosten für die Wartung der Technologie gibt, die derzeit nicht klar sind.