Abschlussbericht zum Gesamtvorhaben

Stabling Automation for Multiple Units – SAMU

Förderkennzeichen:
01FV2055A
01FV2055B
01FV2055C

1. Übersicht zum Projekt SAMU ... 3
2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse ... 4
2.1. Systemanalyse des Fahrzeugs ... 4
2.1.1. Grundlegende Eigenschaften ... 4
2.1.2. TCMS-System ... 5
2.1.3. Fahrzeugzustände ... 6
2.1.4. Schnittstelle zur Mehrfachtraktion ... 7
2.2. Systemanalyse der Stellwerksschnittstelle ... 9
2.3. Führung der Fahrt auf Sicht ... 11
2.3.1. Einleitung ... 11
2.3.2. Umfeldwahrnehmung ... 12
2.3.3. Entscheidungssystem ... 12
2.3.4. Fahrzeug-Fahrweg-Kommunikation ... 14
2.4. Anforderungserhebung ... 14
2.5. Vorbereitung und Durchführung Probebetrieb ... 14
2.5.1. Planung des Probebetriebs ... 14
2.5.2. Vorbereitung ... 15
2.5.3. Durchführung der Versuchsfahrten ... 16
2.6. Beitrag der FH Aachen ... 17
2.7. Beitrag der SWEG ... 17
2.8. Beitrag der Talbot Services ... 18
3. Vergleich der Ergebnisse mit der mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung des Vorhabens ... 18
4. Rückblick auf Erreichung der Ziele ... 19
5. Relvante Ergebnisse von dritter Seite? ... 19
6. Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig? ... 20
7. Fortschreibung des Verwertungsplans ... 20
Referenzen ... 22

1. Übersicht zum Projekt SAMU

Im Bereich des Eisenbahnverkehrs fehlen heute automatisierte Prozesse, obwohl die Infrastruktur isoliert ist und externe Einflüsse minimal sind. Um dem akuten Fachkräftemangel entgegenzuwirken, soll eine Automatisierung einfacher betrieblicher Abläufe wie dem Rangieren auf Abstellgleisen eingeführt werden.

Das Projekt SAMU zielt darauf ab, dafür eine Einheit für Fahrzeuge sowie eine Schnittstelle zur Infrastruktur zu entwickeln. Die Infrastrukturschnittstelle gewährleistet eine sichere Kommunikation von Fahrt- und Haltaufträgen, während die fahrzeugmontierte Einheit die Fahrtfreigabe erhält und ergänzende Daten für die Abstellung auf dem Zielgleis erhält. Sie nutzt verfügbare topographische Daten zur Routenplanung und steuert das Fahrzeug über eine Schnittstelle, die bestehende Zulassungen nicht beeinträchtigt. Während der Fahrt sichert sie den Gefahrraum durch Datenerfassung und -verarbeitung ab und führt automatisch das Auf- und Abrüsten des Fahrzeugs durch.

Das Zusammenspiel dieser Technologien wird auf der Zielinfrastruktur demonstriert, was TRL 6 entspricht. Während der Entwicklung des Demonstrators werden keine sicherheitskritischen Hard- und Softwarekomponenten verwendet. Für die folgende Produktentwicklung ist gemäß DIN VDE V 0831-103 eine Fehlereintrittswahrscheinlichkeit von 10^{-5}/h zu erreichen, was dem SIL-Level SIL 2 entspricht. Die anzupassende Software führt eine Umfeldüberwachung ohne KI durch und konzentriert sich auf die optische Rückstrahlung. Unter der Annahme einer Erkennungsrate von 99,8% pro Lidar-Punkt werden Objekte mit einer Größe, die die Rückstrahlung von 8 Laser-Punkten zulässt, mit einer hohen Wahrscheinlichkeit erkannt und führen zu einer Abbremsung des Fahrzeugs, wenn sie sich im Gefahrraum befinden.

Als Fahrzeugbasis sind die Talent 2-Züge der Südwestdeutschen Landeseisenbahn-GmbH (SWEG) aufgrund der betrieblichen Bedeutung sowie der Verfügbarkeit für Probefahrten vorgesehen. Die Triebzüge dieser Bauart wurden zwischen 2017 und 2021 von der Firma Bombardier an die Österreichischen Bundesbahnen und mehrere nicht-bundeseigene Eisenbahnen in Deutschland, darunter auch die SWEG, ausgeliefert. Bei deutschen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) sind derzeit mehr als 400 Einheiten im Dienst. [1]

Die Talent 2 wurden in verschiedenen Varianten gebaut, mit zwei bis sechs Wagen je Triebzugeinheit. Sie verfügen über eine automatische Frontkupplung der Art Scharfenberg Typ 10 [2] sowie eine elektro-pneumatische Bremse des Herstellers Knorr-Bremse, Bremsanschrift KB C-el-pn-R-A-E-Mg.

Abbildung 1 Talent 2 der Südwestdeutschen Landeseisenbahngesellschaft (Von Bawue - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=111797673)

Im Rahmen der Produktentwicklung wird Know-how von der FH Aachen an die Talbot-Services GmbH übertragen, um die Produktpalette zu erweitern und die Abstellautomatisierung zusammen mit anderen Refurbishment-Maßnahmen zu vermarkten. Dadurch sind ein deutliches Umsatzwachstum sowie ein Zuwachs an industriellen Arbeitsplätzen in den nächsten 5 Jahren möglich.

Der Probebetrieb soll im Bereich des Bahnhofs Riegel-Malterdingen durchgeführt werden. Dieser liegt an der von der SWEG betriebenen Kaiserstuhlbahn und verfügt über ein Bahnsteiggleis sowie ein Übergabegleis zur Rheintalbahn (DB Netz), das als simuliertes Abstellgleis genutzt werden. Abbildung 2 zeigt einen Übersichtsplan des Bahnhofs Riegel-Malterdingen.

Abbildung 2 Übersicht des Bahnhofs Riegel-Malterdingen

Darüber hinaus erlaubt die betriebliche Auslastung des Bahnhofs einen Probebetrieb, da er im Stundentakt bedient wird und wenig Aufenthalt am Bahnsteiggleis 1 besteht.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

2.1. Systemanalyse des Fahrzeugs

2.1.1. Grundlegende Eigenschaften

Bei den Fahrzeugen des Typs TALENT 3 von Bombardier handelt es sich um eine Familie von elektrischen Triebzügen (EMU). Die Fahrzeuge können drei-, vier-, fünf- oder sechsteilig aufgebaut sein. Als Drehgestelle kommen Standard-Drehgestelle (an den Endwagen) und Jakobs-Drehgestelle an den Wagenübergängen zum Einsatz.

Das Fahrzeug ist bei der SWEG als drei-, vier- und fünfteilige Ausführung vorhanden. Die Fahrzeuge sind in der Lage, in Mehrfachtraktion, d.h. als mehrere gekuppelte Triebzugeinheiten, zu verkehren.

Die Druckluft- und Bremsanlage ist als Zweileitungssystem mit Hauptluft- und Hauptluftbehälterleitung ausgeführt. Die Fahrzeuge verfügen damit über eine elektrisch gesteuerte direkte Bremse und als Rückfallebene über eine indirekte pneumatische Bremse, die wie im UIC-System üblich über ein Steuerventil, im vorliegenden Fall ein Kompaktsteuerventil, verfügt.

Fehlerzustände, die vom Triebfahrzeugführer oder den Bremssteuergeräten erkannt werden, führen zur Aktivierung der automatischen pneumatischen Bremse. Die Schnell- oder Zwangsbremsung wird durch eine Schnellbremsschleife initiiert, die als zentrales Mittel dafür dient.

Als Feststellbremse sind Federspeicher an den Bremszangen installiert. Die Aktivierung der Federspeicherbremse für den gesamten Zugverband erfolgt elektrisch über Taster auf dem aktiven Führerpult. Im Falle einer Störung kann die Feststellbremse entweder pneumatisch oder durch eine mechanische Notlöseeinrichtung manuell gelöst werden. Darüber hinaus verfügen die Fahrzeuge über eine automatische Haltebremse.

Jedes Fahrzeugende des Triebzugs ist mit einer automatischen Mittelpufferkupplung vom Typ 10 nach Bauart Scharfenberg ausgestattet. Dabei werden pneumatische Verbindungen für die Hauptluftleitung (HL), die Hauptluftbehälterleitung (HBL) und die Entkuppelleitung gekoppelt.

Die automatische Mittelpufferkupplung verfügt weiterhin über eine Elektrokontaktkupplung. Über diese werden im Fall der Mehrfachtraktionsanwendung die Steuerbefehle sowie sicherheitsrelevante Kontakte, wie bspw. die Schnellbremssschleife, übertragen.

2.1.2. TCMS-System

Das Train Control and Management System (TCMS) des TALENT 3 basiert auf dem modularen MITRAC®-System und hat mehrere Aufgaben, darunter die Steuerung, Überwachung und Diagnose des Fahrzeugs und seiner Systeme sowie des Zugverbands. Die Hauptfunktionen des TCMS-Systems sind:

- Fahrzeugsteuerung,
- Fahrzeugüberwachung,
- Fahrzeugdiagnose, und
- Management des Kommunikationsnetzwerks und damit verbundene Support-Funktionen.

Zur Steuerung verfügt der TALENT 3 neben konventionellen elektrischen Steuerleitungen über folgende Bus-Systeme:

- WTB (Wired Train Bus): Zugbus für Aufgaben außerhalb der eigenen Triebzugeinheit sowie übergreifend im Zugverband, insbesondere Mehrfachtraktionssteuerung,
- MVB (Multipurpose Vehicle Bus): Fahrzeugbus für Steuerungsaufgaben innerhalb einer Triebzugeinheit,
- IP-Bus ECR-C: Ethernetbasierter Bus für fahrzeuginterne Komfort- und Anzeigefunktionen,

- IP-Bus ECR-O: Ethernetbasierter Bus für fahrzeuginterne Aufgaben, die den Betrieb des Fahrzeugs betreffen,
- Train-IP ETB-C: Ethernetbasierter Bus für Komfortfunktionen innerhalb eines Zugverbands, bspw. Videobildübertragung ins führende Fahrzeug und
- Train-IP ETB-O: Ethernetbasierter Bus für betriebliche Kommunikation im Zugverband.

2.1.3. Fahrzeugzustände

In Vorbereitung der automatischen Abstellung wurden die Fahrzeugzustände analysiert. Das Fahrzeug kann mehrere Zustände (Fahrzeugzustand, FZ) einnehmen, die den Grad der Betriebsbereitschaft ausdrücken:

FZ00: Batterie ausgeschaltet und Trennstecker abgezogen. Er dient der Herstellung einer vollständigen Spannungsfreiheit des Fahrzeugs und kann nur durch manuelles Verbinden der Batteriestecker verlassen werden.

FZ0: Zustand „Batterie aus“. Nur sicherheitsrelevante Verbraucher werden aus der Batterie versorgt. Für das Aufrüsten ist ein manueller Eingriff am Fahrzeug notwendig.

FZ1: Zustand „Fahrbereit abgeschlossen“. Mindestens ein Batteriehauptschalter ist eingeschaltet, der Stromabnehmer am Fahrdraht angelegt und der Hauptschalter ist eingeschaltet. Alle Führerstände sind deaktiviert.

FZ2: Zustand „Fahrbereit aufgeschlossen“. Mindestens ein Batteriehauptschalter ist eingeschaltet, der Stromabnehmer am Fahrdraht angelegt und der Hauptschalter ist eingeschaltet. Ein Führerstand ist aktiviert und das Fahrzeug ist fahrbereit.

FZ3: Zustand „Aufgerüstet abgestellt“. Dieser Zustand kann aus dem FZ2 erreicht werden. Er kann für bestimmte oder unbestimmte Zeit gewählt werden. Energieintensive Verbraucher sind abgeschaltet oder deaktiviert, die Klimatisierung ist eingeschränkt. Bei aufgerüsteter Abstellung mit Zeitvorgabe wird eine Vorklimatisierung vorgenommen und in den FZ6 gewechselt.

FZ4: Zustand „Energieoptimiert abgestellt“. Aus dem FZ2 mit einer Bereitstellungszeit erreichbar. In diesem Zustand ist der Stromabnehmer nicht am Fahrdraht angelegt und wird bei Bedarf kurzzeitig, zum Beispiel für Reinigung oder zum Nachladen der Batterie, gehoben.

FZ5: Zustand „Temporär aufgerüstet“. Dieser Zustand wird aus FZ4 erreicht, um FZ6 anzustoßen oder für die Maßnahmen in FZ4.

FZ6: Zustand „Vorbereitungsdienst“. In diesem Zustand wird das Fahrzeug durch folgende Maßnahmen auf den Betrieb vorbereitet:

- Druckluft wird nach Bedarf bereitgestellt.
- Die Batterien werden nach Bedarf geladen.
- Klimaanlagen, die während der Abstellung nur den Frostschutz aufrechterhalten haben, regeln die Temperatur so, dass sie am Ende der Vorbereitung den für den Fahrbetrieb vorgegebenen Wert erreichen (die Klimaanlage im Führerraum wird auf den Wert eingestellt, den der Triebfahrzeugführer vor der Abstellung gewählt hat).
- Verbraucher, die während der Abstellung zur Energieeinsparung ausgeschaltet waren, werden wieder aktiviert.

- Anschließend wird die automatische Bremsprobe durchgeführt.
- Test der Zugsteuerleitungen für Brandmeldung, Notbremsüberbrückung und Türschleife.

Dieser Zustand wird spätestens 42 Minuten vor der eingestellten Zeit eingenommen.

2.1.4. Schnittstelle zur Mehrfachtraktion

Basis für die Kommunikation im Fahrzeug und im Zugverband ist das TCN-Netzwerk (Train

Communication Network) gemäß dem Standard IEC 61375, dass aus dem WTB (Wire Train Bus) als Kommunikationsmedium im Zugverband und dem MVB (Multifunction Vehicle Bus) als Kommunikationsmedium im Fahrzeug besteht. Ergänzend kommt auf Zugverbandsebene und Fahrzeugebene ein Ethernet-Netzwerk zum Einsatz.

Für die Kopplung zwischen WTB und MVB sind Gateways integriert, welche für die erforderlichen Übertragungsprotokolle auf dem WTB und MVB zuständig sind und die die Verteilung der Informationen auf dem WTB und MVB sicherstellen. Die Gateway-Funktionalität basiert auf dem UIC-Merkblatt 556.

Neben der Datenübertragung über die Bussysteme sind einige wichtige Steuerinformationen wie „Fahren“ und „Bremsen“, die Grünschleife sowie sicherheitsrelevante Funktionen wie die Schnellbremsschleife als diskrete Steuerleitungen ausgeführt. Diese Zugsteuerleitungen arbeiten mit der Spannung des batteriegestützten Bordnetzes. Damit ist ein Minimalbetrieb zum Räumen der Strecke auch bei Ausfall der Leittechnik gewährleistet.

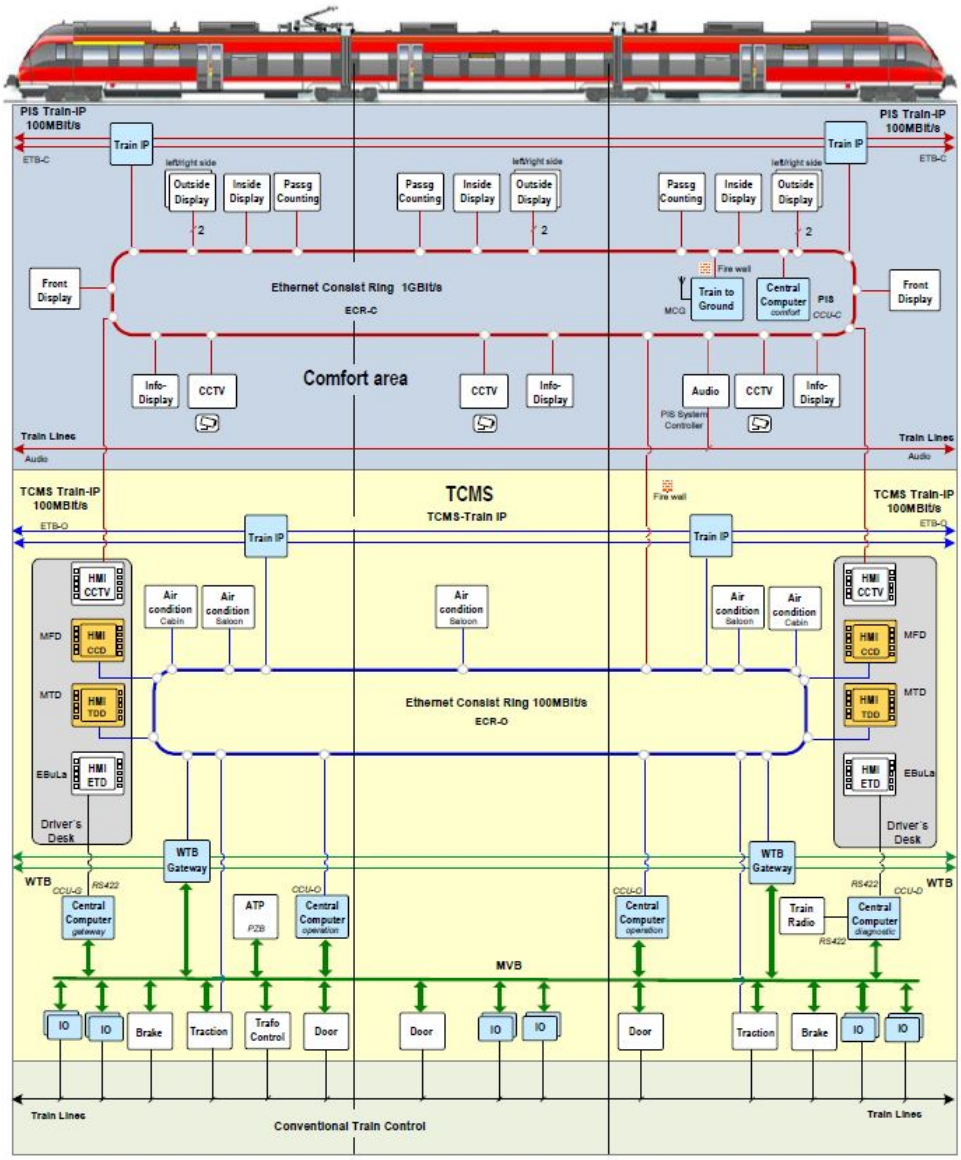

Abbildung 3 Steuerungsarchitektur des Zielfahrzeugs

Demzufolge sind die nachstehenden Funktionen Hauptbestandteil des Funktionsumfangs des Rechners CCU-O:

- Selbsttestfunktionen beim Aufrüsten der Leittechnik,
- Steuerung der Betriebszustände des Fahrzeugs bzw. des Zugverbandes,
- Stromabnehmer und Hauptschaltersteuerung,
- anteilige Hilfsbetriebesteuerung,
- anteilige Steuer- und Überwachungsfunktionen für den Kühlkreislauf,
- Sollwertvorgabe (Fahrtrichtungsvorgaben, Zug- und Bremskraftsollwerte),
- Geschwindigkeitsistwert-Aufbereitung,
- Wegmessung (auf Basis der vom Antriebs- und Bremssystem erfassten Werte),
- Initialisierung und Auswertung der Ergebnisse von Bremsproben,
- Eine laufende Bremsprobe, der jeweilige Zustand der Bremsen und das generelle Ergebnis der automatischen Bremsprobe werden auf einem Display angezeigt bzw. können auf einem Display angezeigt werden.

Die Schnittstelle ist nach der Norm IEC 61375 implementiert, jedoch gibt diese wenig Informationen bspw. zum Zeitverhalten. Im Rahmen der Entwicklung musste daher in großem Umfang auf reverse Engineering gesetzt werden. Dazu wurden mehrmals die Kommunikation während der Kuppel- und Zugbildungsprozesse aufgezeichnet und die erhaltenen Daten analysiert.

2.2. Systemanalyse der Stellwerksschnittstelle

Im Rahmen des vorliegenden Projektes basiert die SAMU-Schnittstelle zur Eisenbahninfrastruktur auf einem Konzept, das durch seine Einfachheit und Effizienz überzeugt. Ziel dieses Ansatzes ist es, den autonomen Rangierbereich digital zu markieren und somit eine präzise Steuerung sowie Überwachung des Zugbetriebs zu ermöglichen. Aufgrund der Tatsache, dass die Abstellgleise und das Bahnsteiggleis in einem typischen, räumlich limitierten Bahnhofsareal nahezu konstante Einsatzbedingungen aufweisen, reduziert sich die Komplexität der zu analysierenden streckenseitigen Elemente auf eine überschaubare Anzahl. Die hierbei erforderlichen Aufgaben der Erfassung, Auswertung und Steuerung werden zentral im SAMU-Schaltschrank (SAMU-LEC) realisiert.

Zur Identifikation des Rangierweges und zur Erteilung der Fahrbefugnis wird auf bereits vorhandene Überwachungskontakte zurückgegriffen, wobei diese durch zusätzliche Stromfühler unterstützt werden können. Dabei kommen insbesondere Signale und Weichen in Betracht, die über Systeme wie die PZB-Schnittstelle, elektrische Weichenmelder oder Sh1-Lampenstrommelder bedient werden. Anhand der von diesen Sensoren gelieferten Schwellenwerte wird das streckenseitige Rangiersignal ausgewertet. Dieses Signal dient als Indikator für die Momentaufnahme des Rangierweges und zeigt gleichzeitig an, ob die erforderliche Fahrberechtigung erteilt wurde. Das daraus resultierende Datenset wird unmittelbar in das SAMU-System eingespeist, ohne dass der Einsatz zusätzlicher Ein- oder Ausgänge am Stellwerk notwendig wird. Durch diesen Wegfall komplexer Schnittstellenanpassungen lassen sich kostspielige Softwareänderungen sowie aufwendige Neuzertifizierungsprozesse des Stellwerks umgehen.

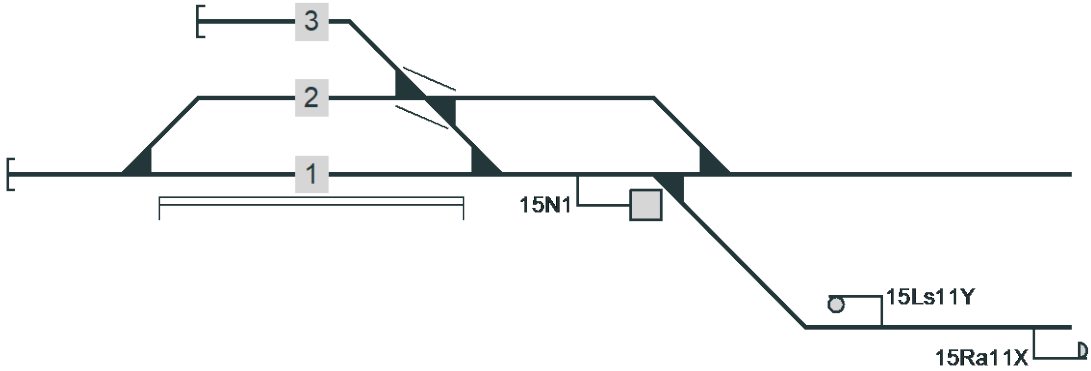

Abbildung 4 Situation im ursprünglich geplanten Erprobungsfeld Riegel-Malterdingen: Lageplan (oben), Gleisbild mit vorgesehenem Fahrweg (unten)

Im gewählten Anwendungsszenario erfolgt der Übergang vom Bahnsteig 1 zum Gleis 15 über einen Fahrweg mit zwei Weichen und insgesamt drei Signalen bzw. Tafeln. Die Strecke, die in Abbildung 4 als orangefarbene Linie visualisiert wird, stellt dabei einen exemplarischen Fall dar, der die Herausforderungen sowie die zu überbrückenden Schnittstellenkomponenten verdeutlicht. Für eine zuverlässige Überwachung und exakte Festlegung des Rangierweges erscheint es sinnvoll, eine Kombination aus unterschiedlichen Sensorikansätzen zu verwenden. So werden beispielsweise die Überwachungskontakte der Weichenantriebe herangezogen, um den physischen Fahrweg präzise zu bestimmen, während die Erfassung des Lampenstroms der Signalleuchte Sh1 des 15N1 ein klar definiertes Signal zur Fahrberechtigung liefert. Durch diese duale Sensorik ist es möglich, sowohl den exakten momentanen Rangierbereich als auch die Berechtigung zur Fortsetzung des Rangierbetriebs zu kommunizieren.

Darüber hinaus wird das Gesamtkonzept dahingehend erweitert, dass im Betrieb eine situative Steuerung mittels der in Abschnitt 2.3 vorgestellten Technik zur Wahl der Höchstgeschwindigkeit erfolgt. Bei Sichtführung wird die jeweilige Lokalsituation dynamisch bewertet, sodass beispielsweise in einer Notsituation die Fahrberechtigung des Rangierzugs entzogen werden kann. Dies geschieht durch das Umschalten des Rangiersignals in den Haltzustand (Sh0), was unmittelbar vom SAMU-LEC registriert wird. Auch wenn dieses Vorgehen Ähnlichkeiten mit dem fahrergesteuerten Rangieren aufweist, bleibt die Wirkung weitgehend auf den unmittelbaren Einflussbereich des betroffenen Signals beschränkt – ein Aspekt, der besondere Sicherheit im operativen Betrieb gewährleistet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Integration der SAMU-Schnittstelle zur Eisenbahninfrastruktur nicht nur eine präzise Überwachung des Rangierbetriebs

ermöglicht, sondern auch flexible Optionen zur Anpassung an betriebliche Herausforderungen bietet. Durch den Einsatz bereits existierender Überwachungskontakte und die Ergänzung gezielter Sensorik wird eine kosteneffiziente sowie technologisch zukunftssichere Lösung realisiert, die den hohen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanforderungen im Eisenbahnbetrieb gerecht wird. Diese Lösung erlaubt es, den Betrieb sowohl im Normal- als auch im Notfallbetrieb optimal zu steuern und stellt gleichzeitig sicher, dass kostspielige Umbauten und aufwändige Zertifizierungsverfahren vermieden werden können.

2.3. Führung der Fahrt auf Sicht

2.3.1. Einleitung

Die vorgesehene Automatisierung der Fahrbewegung soll mit möglichst wenig Erweiterungen auf bestehender Infrastruktur durchgeführt werden. In Tabelle 1 sind die Automatisierungsgrade (Grades of Automation, GoA) gemäß der UITP-Definition [3].

Tabelle 1 Übersicht der Grades of Automation mit Anforderungen an Fahrzeug und Infrastruktur (ergänzt nach [3])

Grade of Automation	Operation type	Description	Infrastructure and vehicle requirements
GoA0	On-Sight	No automation, fully reliant on driver.	None
GoA1	Manual	Vehicle operation manual, protection against errors by train protection system, e.g. German PZB.	Low: Most legacy systems provide the functionality.
GoA2	Semi-automatic	Driving functions are automated, mostly relying on an advance train protection system which includes positioning of the train and continuous exchange of commands, e.g. German LZB. A driver in the cab is still responsible to ensure safe passenger transfer, freedom of movement of the vehicle and can take over the control in case of emergency.	Medium: Updated tracks, e.g. in the high-speed network, provide sufficient infrastructure. No special equipment of the vehicles required.
GoA3	Driverless	In addition to driving functions, door operation is also automated which requires no driver in the cab. A member of staff is in the vehicle to take over control of the train in case of emergencies.	High: Track infrastructure as for GoA2. Vehicle equipment has to ensure safety of passengers during boarding and alighting as well as provide obstacle detection means.
GoA4	Unattended	All operations can be performed without staff on train, also in emergency situations.	High: In addition to GoA3 requirements on vehicle and infrastructure, the installation of platform screen doors is recommended.

Mit der Klassifizierung wie in Tabelle 1 ergibt sich die Aufgabe, einen GoA 4-Betrieb in einem sehr reduzierten Bereich mit einem Fahrzeug, das den Anforderungen von GoA 1 entspricht, auf einer GoA 0-Infrastruktur durchzuführen.

Es ist also eine fahrzeugseitige Gefahrraumüberwachung, eine kontinuierliche Kommunikationsmöglichkeit sowie eine Schnittstelle zur Stellwerkstechnik vorzusehen. Alle drei Ergänzungen sollen so vorgenommen werden, dass die Zulassungen von Fahrzeug und Stellwerk erhalten bleiben.

2.3.2. Umfeldwahrnehmung

Das Umfeldwahrnehmungssystem muss einerseits einen ausreichend sicheren Betrieb ermöglichen, andererseits aber auch eine ausreichende Leistung, typischerweise ausgedrückt in der Geschwindigkeit für die Rangierbewegung, gewährleisten. Da der vorgesehene Abstellbetrieb im Rangierbetrieb stattfindet, beträgt die Höchstgeschwindigkeit laut Vorschrift 25 km/h. Eine eingehende Untersuchung der Bremswege bei niedrigen Geschwindigkeiten findet sich in [4].

Da es sich bei dem Zielsektor um Triebzüge handelt, ist davon auszugehen, dass die Verzögerung relativ konstant ist und die Füllzeit geringer als bei der UIC-Bremse ist.

Der Bremsweg für verschiedene Anfangsgeschwindigkeiten ist in Abbildung 5 dargestellt.

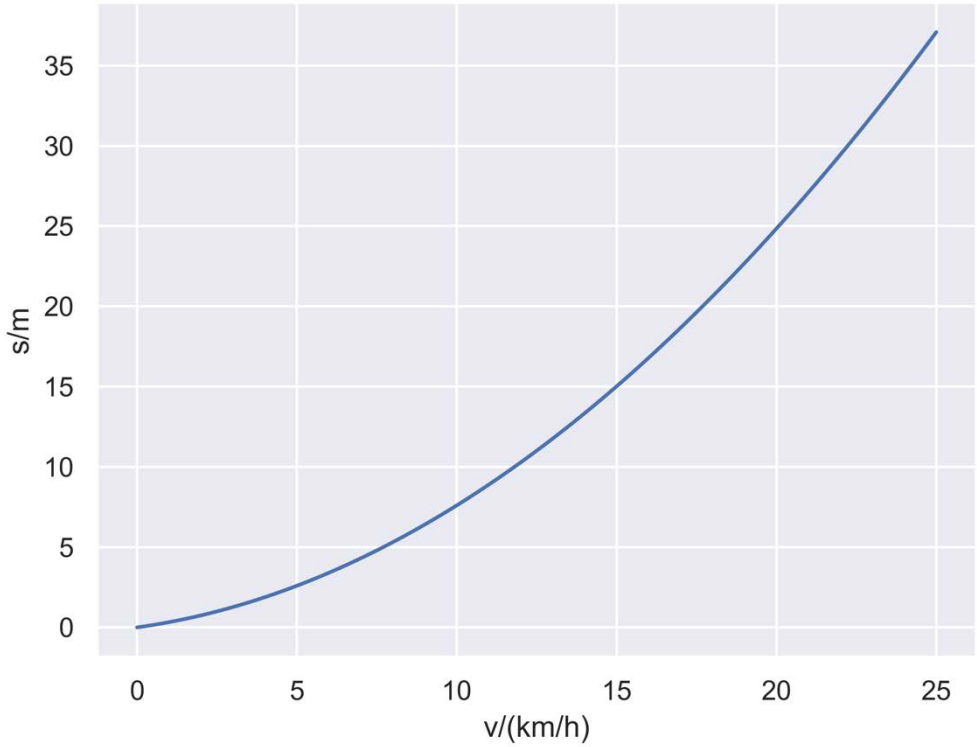

Abbildung 5 Bremswege für verschiedene Geschwindigkeiten im Rangierbetrieb

Alle Anhaltewege liegen innerhalb der Reichweite kostengünstiger Lidar-Sensoren, und handelsübliche Kameras sind in der Lage, Objekte innerhalb dieses Bereichs zu erkennen. Das Wahrnehmungssystem kann daher auf leicht verfügbaren Sensoren basieren.

2.3.3. Entscheidungssystem

Das Entscheidungssystem hat die Aufgabe, die geplante Fahrbahn auf eventuelle Hindernisse zu untersuchen, die das Fahren behindern könnten. Die Entscheidung, ob

gefahren werden soll, muss so getroffen werden, dass ein Unfall vermieden wird. Die deutsche Norm [6] sieht eine Risikobewertungsmatrix vor. Für Unfälle im Rangierbetrieb sind die Anforderungen entweder keine in Risikoklasse A oder eine Hazard Rate von 10^{-5}/h oder besser für Risikoklasse B.

Tabelle 2: Risikokategorien und Beispielszenarien (ausgewählt aus [5])

Kategorie	Beispielszenarien (ausgewählt)	Risiko
A	• Kontakt des Rangierbewegers mit dem Objekt • Unzeitgemäße Betätigung der Notbremse	Keine Verletzungen
B	• Kontakt eines Güterzuges mit einem Objekt • Kollision von Rangierbewegungen	Eine leichte Verletzung

Die im SAMIRA-Projekt bereits etablierte Lösung nutzt anstelle der Analyse von Objekten im Fahrweg des Fahrzeugs die Informationen des LIDAR-Scanners, um die freie Strecke vor dem Fahrzeug zu analysieren.

Anhand dieser freien Strecke wird die aktuell mögliche Geschwindigkeit so gewählt, dass ein Anhalten vor dem Ende dieser freien Strecke möglich ist. Auf diese Weise ähnelt die Entscheidung und die Auswahl der Geschwindigkeit mehr dem Konzept des Betriebs in Moving Blocks.

Wie in Abbildung 6 dargestellt, ist die Auflösung hoch genug, um ein solches Verfahren für die in Abbildung 5 dargestellten Bremswege zu ermöglichen.

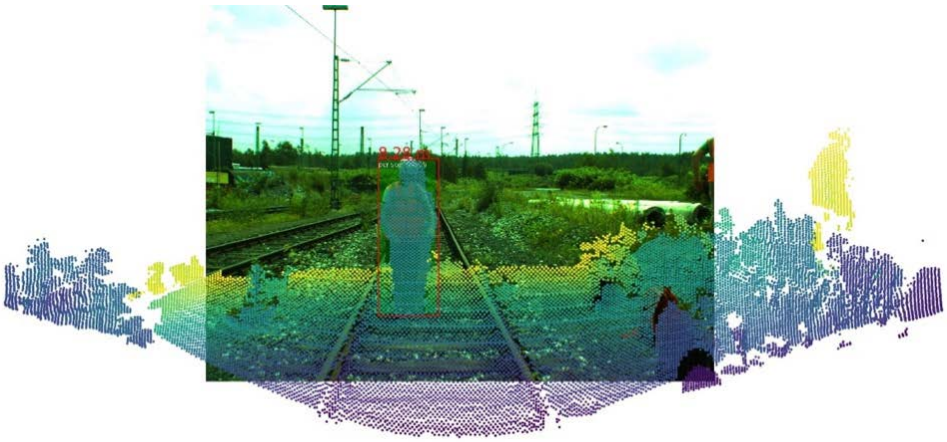

Abbildung 6 Person in der geplanten Trajektorie einer Rangierbewegung (Bild vom stehenden Fahrzeug aus aufgenommen)

Ein verbleibendes Problem bei diesem Entscheidungsalgorithmus ist die Erkennung des Fahrwegs, auch als Gefahrraum bezeichnet. Da die meisten den Autoren bekannten Algorithmen auf potenziell unsicheren Bildverarbeitungstechniken beruhen, wird ein konservativer Ansatz vorgeschlagen, der auf dem minimalen Radius in beiden Richtungen des Fahrzeugs basiert, die in der Analyse der Bewegungsfreiheit zusammengeführt werden, um den für die Fortsetzung der Bewegung erforderlichen Raum zu bilden.

Abbildung 7 Schätzung des Gefahrraums

Ein solcher Raum ist in Abbildung 7 dargestellt, die für einen kleinen Radius von 50 m maßstabsgetreu gezeichnet ist. Der maximale Abstand, der als sicher frei betrachtet werden kann, beträgt 12,7 m, was eine maximal mögliche Geschwindigkeit von etwa 10 km/h ergibt. Die Situation verbessert sich bei einem Mindestradius von 300 m, dem Standardpunktradius für deutsche Infrastrukturen. Unter dieser Annahme beträgt die maximal erfassbare freie Strecke 31 m, woraus sich eine Höchstgeschwindigkeit von etwa 20 km/h ergibt. Beide Geschwindigkeiten sind für den automatischen Rangierbetrieb ausreichend, da die Fahrzeit im Vergleich zum Fahren durch Personal weniger entscheidend ist.

2.3.4. Fahrzeug-Fahrweg-Kommunikation

Zur Sicherstellung einer verfügbaren und sicheren Kommunikation zwischen der Fahrwegs- und der Fahrzeugeinheit wurde auf einen im Gleis verlegten Linienleiter gesetzt. Dieser genügt, in Form der Linienförmigen Zugbeeinflussung (LZB) den Anforderungen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs. Die Komponenten sind für die Demonstration jedoch aus dem Nahverkehrsbereich gewählt.

Die LZB-Technik ermöglicht neben einer sicheren und verfügbaren Kommunikation der Fahrtfreigabe sowie einer schnell wirksamen Kommunikation eines Nothalts ebenfalls eine Ortung des Fahrzeugs durch Phasenwechsel der Leiterschleifen. Im Projekt SAMU war diese Ortung aufgrund der geringen Komplexität der Rangierfahrstraßen jedoch nicht nötig.

2.4. Anforderungserhebung

Gemeinsam mit den Projektpartnern und unter Beteiligung wurden die Anforderungen erhoben und einem Lastenheft gesammelt. Hier ist besonders die Einbindung von Experten aus den Bereichen Infrastruktur und Betrieb der SWEG sowie aus dem Bereich Fahrzeuge der Talbot Services hervorzuheben.

Das Lastenheft für SAMU konnte trotz der vielfältigen Einflüsse aus Betrieb und Fahrzeugtechnik konzise gehalten werden und verspricht daher die erhoffte kostengünstige Lösung.

2.5. Vorbereitung und Durchführung Probebetrieb

2.5.1. Planung des Probebetriebs

Der Probebetrieb sollte zunächst an betrieblichen Bahnhöfen der SWEG stattfinden, wie oben dargestellt wurde zuletzt der Bahnhof Riegel-Malterdingen vorgesehen. Aufgrund einer kurzfristig aufgetretenen, durch einen Unfall bedingten reduzierten Verfügbarkeit von Fahrzeugen, musste stattdessen auf eine Erprobung im Betriebswerk der SWEG in Pforzheim ausgewichen werden.

Das Betriebswerk unterscheidet sich von den Bahnhöfen im SWEG-Netz zuvorderst darin, dass keine Stellwerkstechnik verbaut ist. Diesem Mangel im Demoszenario wurde seitens des Konsortiums dadurch begegnet, dass eine Simulation der betreffenden Stellwerkstechnik aufgebaut wurde. Diese Simulation umfasst eine vereinfachte Stellwerkslogik sowie ein Weichensignal. Aus diesem Weichensignal konnte dann wie vorgesehen die Information zur Fahrtfreigabe an das Fahrzeug gegeben werden.

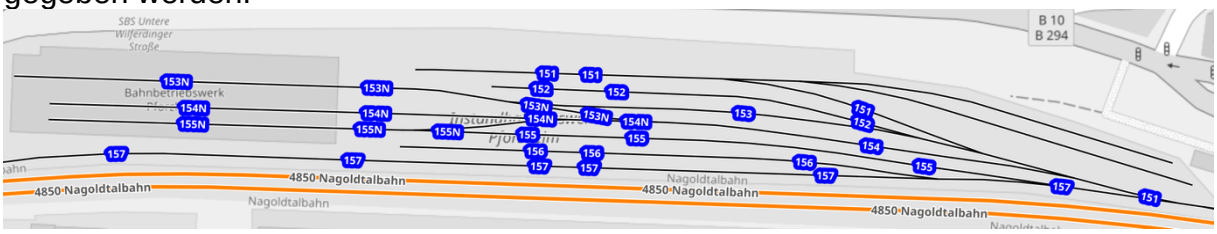

Abbildung 8 Gleisplan Betriebswerk Pforzheim (SWEG) (Quelle: openrailwaymap.org)

2.5.2. Vorbereitung

Die Vorbereitungen des Probebetriebs wurde während der gesamten Projektlaufzeit in regelmäßigen Videokonferenzen vorangetrieben. Dazu wurde von Seiten der Landeseisenbahnaufsicht eine Ausnahmegenehmigung für den vorgesehenen Betrieb in Riegel-Malterdingen erreicht.

Weiterhin wurden für den Probebetrieb zwei Hardware-Aufbauten in robusten, wasserdichten Koffern erstellt. Die Hardware-Aufbauten dienen als Fahrzeug-Einheit bzw. als Schnittstelle zur Infrastruktur. Die Nutzung von mobilen Einheiten anstelle von fest eingebauten Ergänzungen hat den Vorteil, dass eine Erprobung unabhängig vom konkreten Fahrzeug und Erprobungsfeld möglich ist.

Abbildung 9 SAMU-Fahrzeugeinheit (links) und Infrastruktur-Schnittstelle (SAMU-LEC) (rechts)

In der Fahrzeugeinheit befinden sich

- ROS2-Rechner NVIDIA ORIN nano,
- Mikrokontroller-basierte Schnittstelle zur LZB,
- LZB-Hardware,
- Ergänzenden Hardware, z.B. zur Spannungsversorgung,
- LZB-Antenne und
- Umfeldsensorik, bestehend aus
    - Lidar-Sensor Blickfeld Cube 1 und
    - Sterokamera ZED 2i.

Die Fusionierung und Verarbeitung der Informationen aus der Umfeldsensorik und der LZB erfolgt auf der Middleware ROS2 (Robot Operating System). Dort wird auch die inverse Bremswegberechung sowie die Darstellung der Informationen für das Betriebspersonal umgesetzt.

In der Infrastruktureinheit SAMU-LEC befindet sich ein Mikrocontroller für das Auslesen der Lampenstromüberwachung der zugeordneten Signale sowie die Ansteuerungseinheit für die LZB.

Der Linienleiter wird mittig im Gleis verlegt und kann Distanzen zwischen Leiter und Antenne von ca. 50 cm ohne Schwierigkeiten überbrücken. Derzeit wird seitens der SAMU-LEC lediglich die Information „Fahrtfreigabe Ja/Nein“ übertragen, weitere Informationen sind jedoch möglich.

2.5.3. Durchführung der Versuchsfahrten

Aufgrund der kurzfristigen Änderung des Zielfahrzeugs konnte die Schnittstelle zur Mehrfachtraktionssteuerung nicht genutzt werden. Daher wurde eine Schnittstelle für den Triebfahrzeugführer (Tf) umgesetzt, die die wesentlichen Informationen über Foxglove für den Tf darstellt und ihn so die Schnittstelle simulieren lässt.

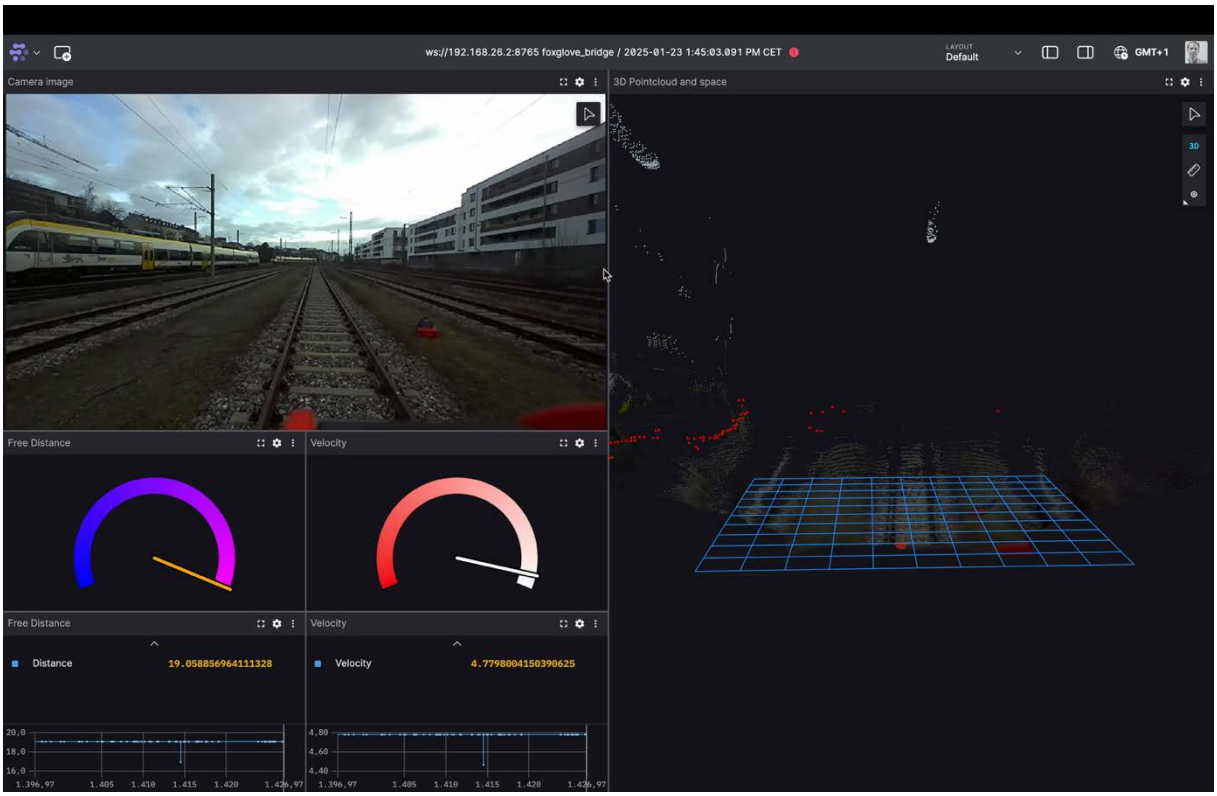

Abbildung 10 SAMU User Interface. Situation: kein Hindernis um Gefahrraum, mögliche Fahrgeschwindigkeit 5 km/h

In Abbildung 10 ist das User Interface dargestellt, es enthält neben den Informationen für den Tf auch das aktuelle Kamerabild, die Punktewolke des Lidar (rechts) mit rot markierten potenziellen Gefahrenpunkten.

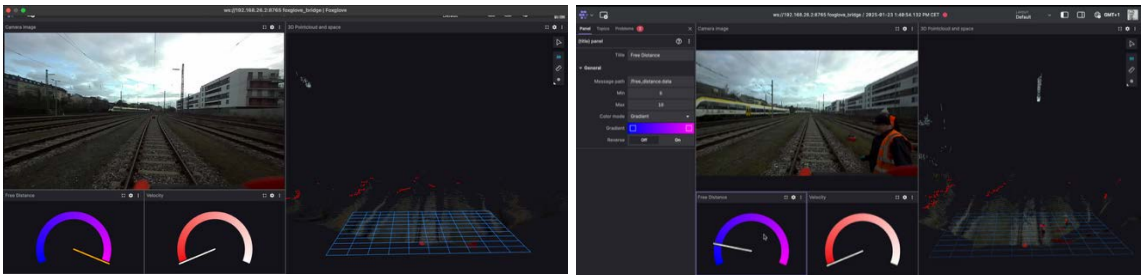

Abbildung 11 Darstellung von Wegnahme der Fahrtfreigabe (links) und Person im Gefahrrraum (rechts)

Abbildung 11 zeigt die Darstellung für die Fälle „Nothalt“ – in diesem Fall wird die Zielgeschwindigkeit für den Tf auf 0 gesetzt sowie „Person im Gefahrraum“ – es liegt keine Fahrtfreigabe vor, die Entfernung wird jedoch korrekt reduziert.

2.6. Beitrag der FH Aachen

Die FH Aachen hat durch Entwicklung der Software und Hardware, durch Planung und Durchführung des Testfahrten sowie durch die Dokumentation und Publikation der Ergebnisse zum Projekt beigetragen.

2.7. Beitrag der SWEG

Die SWEG leistete im Rahmen des Forschungsvorhabens einen substantiellen Beitrag zur Umsetzung und Absicherung der Projektarbeiten. Sie beteiligte sich kontinuierlich an den regelmäßigen Abstimmungsterminen mit der Projektkoordination der TRAPICO sowie den zuständigen Fachingenieuren der SWEG aus den Bereichen Flotte und Infrastruktur. In diesem Zusammenhang führte die SWEG detaillierte Analysen zur Betriebssituation durch, mit dem Ziel, geeignete Testszenarien zu identifizieren, die ohne Beeinträchtigung des regulären Eisenbahnbetriebs realisierbar sind.

Zur rechtlichen Absicherung der Versuche wurde durch die SWEG eine Nicht-Eingriffsgenehmigung bei der Landeseisenbahnaufsicht (LEA) eingeholt. Sowohl der Betriebsleiter des Eisenbahnverkehrsunternehmens SWEG als auch der Betriebsleiter des Eisenbahninfrastrukturunternehmens SWEG Schienenwege GmbH waren in diesen Prozess eingebunden, um der LEA dezidiert darzulegen, dass sämtliche sicherheitsrelevanten Kriterien eingehalten werden. Die Genehmigung war Grundlage für die Durchführung potenzieller Teststellungen unter klar definierten Auflagen. Darüber hinaus wirkte die SWEG aktiv an der Durchführung der Messungen mit und stellte die erforderliche Anbindung an das elektronische Stellwerk sicher.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden Fahrzeuge an den Standorten Offenburg und Pforzheim bereitgestellt. Dies schloss die Bereitstellung von Personal für Rangier- und Kupplungstests ein, wodurch die praktische Durchführung der Testfälle gewährleistet werden konnte. Ergänzend stellte die SWEG die notwendigen Fahrzeugunterlagen zur Verfügung, die für die technische Anbindung des Zuges an die Versuchsinfrastruktur erforderlich waren. In diesem Zusammenhang wurde in Abstimmung mit dem Forschungspartner und dem Fahrzeughersteller eine Geheimhaltungsvereinbarung geschlossen, die die Vertraulichkeit sensibler technischer Informationen sicherstellte. Auf dieser Grundlage konnte zudem die Herausgabe des Instandhaltungshandbuchs erwirkt werden, das für die detaillierte

Analyse und Integration der Fahrzeuge in die Versuchsarchitektur von zentraler Bedeutung war.

Schlussendlich hat die SWEG eine umfassende Analyse der betrieblichen Auswirkungen teilautomatisierter Prozesse durchgeführt. Dabei wurde insbesondere untersucht, inwieweit sich durch Automatisierung wirtschaftliche Vorteile wie reduzierte Personal- und Betriebskosten erzielen lassen. Die Analyse zeigte, dass mit Hilfe der SAMU-Box potenziell Abläufe wie das Abstellen und Bereitstellen von Fahrzeugen effizienter gestaltet und die Fahrzeugverfügbarkeit erhöht werden kann.

2.8. Beitrag der Talbot Services

Die Talbot Services hat im Rahmen des Forschungsvorhabens einen maßgeblichen Beitrag zur Analyse der Anforderungen und Schnittstellen geleistet. Ihr Beitrag lag darüber hinaus in der Planung und Durchführung der Probefahrten sowie in der Einbringung ihres technischen Know Hows in Bezug auf Schienenfahrzeuge. Zudem wurden gemeinsam mit der FH Aachen Versuchsfahrten mit vergleichbaren Fahrzeugtypen auf dem Firmengelände der Talbot Services realisiert, um relevante Daten aufzuzeichnen und auswerten zu können. An der Umsetzung des Forschungsvorhabens waren dabei vornehmlich Führungskräfte beteiligt, wodurch sich der Anteil abzurechnender Personalkosten auf ein Minimum beschränken ließ.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens bieten die Grundlage, das Dienstleistungsportfolie der Talbot Services im Bereich des Refurbishments von Triebfahrzeugen zukünftig weiter ausbauen zu können. Als breit aufgestellter Integrator technischer Systeme in Schienenfahrzeuge, bietet die Talbot Services die infrastrukturellen, personellen und technischen Möglichkeiten, Fahrzeuge entsprechend aufzurüsten. Analog zu aktuell laufenden Integrationsprojekten von ETCS-Systemen, besteht somit im Falle des Kundeninteresses zukünftig die Möglichkeit, die Fahrzeuge mit SAMU-Boxen auszustatten. Hierdurch ist ein weiterer Aufbau von Arbeitsplätzen und eine Steigerung des Umsatzes möglich. Verstärkt werden kann dieser Effekt durch den Umstand, dass derartige Modernisierungsmaßnahmen oftmals in Kombination mit weiteren Aufwertungsmaßnahmen an den Fahrzeugen vergeben werden, um die Werkstattaufenthalts- und damit die Ausfallzeiten der Fahrzeuge möglichst gering zu halten. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse über die SAMU-Box und deren Integration bieten der Talbot Services die Möglichkeit, ihre Marktposition im Bereich des Refurbishments zu stärken und auszubauen.

3. Vergleich der Ergebnisse mit der mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung des Vorhabens

Die Arbeiten am Projekt haben trotz des erheblichen Personalmangels bei allen Projektpartnern weitgehend nach dem ursprünglichen Plan stattfinden können. Die Analyse der Fahrzeugschnittstelle hat sich als deutlich aufwendiger herausgestellt als angenommen, hier ist zu beobachten, dass die Fahrzeughersteller die entsprechende Norm nur rudimentär einhalten. Weiterhin wurde eine Offenlegung der Kommunikationsschnittelle, auch nach Vermittlung der SWEG, nicht ermöglicht.

Die Änderung der Fahrzeugbasis im Projektzyklus hatte zur Folge, dass die Fahrzeugschnittstelle durch einen Tf ersetzt werden musste. Die Gründe hierfür liegen in Fahrzeugunfällen während Projektlaufzeit und entziehen sich damit dem Einfluss des Konsortium.

Das Ziel, eine universelle Schnittstelle zur Steuerung von Fahrzeugen über die Mehrfachtraktionsschnittstelle zu implementieren wurde nach den oben erwähnten Messungen zugunsten einer baureihen-individuellen Schnittstelle geändert. Die Begründung liegt in der ebenfalls vorliegenden individuellen Implementierung der Fahrzeughersteller.

4. Rückblick auf Erreichung der Ziele

Es wurden folgende Ziele erreicht:

- Automatisierung von einfachen, betrieblichen Abläufen
    - Dieses Ziel wurde mit oben dargelegter Einschränkung erreicht. Die implementierte Software ist grundsätzlich geeignet und benötigt eine fahrzeugspezifische Software, idealerweise mit Beteiligung der Hersteller.
    - Entwicklung einer fahrzeugmontierten Einheit
        - Die fahrzeugmontierte Einheit erhält die Fahrtfreigabe und ergänzende Daten, z.B. den Ort der Abstellung auf dem Zielgleis. Sie steuert das Fahrzeug unter Nutzung einer rückwirkungsfreien Schnittstelle (um bestehende Zulassungen zu erhalten) und sichert während der Fahrt den Gefahrraum durch Datenerfassung und -verarbeitung ab.
    - Entwicklung einer Schnittstelle zur Infrastruktur
        - Diese realisiert eine sichere Kommunikation von Fahrt- und Haltaufträgen.

Nicht umgesetzt wurden folgende Anteile des Vorhabens:

- Die Fahrzeugeinheit nutzt als Open Data verfügbare topographische Daten zur Planung der Fahrt.
    - Die Fahrwegsplanung mit Open Data war für die durchgeführten Szenarien nicht nötig und wurde angesichts der Personalengpässe im Projekt nicht durchgeführt.
- Die Fahrzeugeinheit führt das das Auf- und Abrüsten des Fahrzeugs automatisch durch.
    - Hier ließ sich die Schnittstelle nicht entsprechend entwickeln.

5. Relvante Ergebnisse von dritter Seite?

Im Laufe der Projektbearbeitung wurde Kontakt mit dem parallel in der Entwicklung befindlichen Projekt „Automated Train“ aufgenommen. Es handelt sich um ein auf den ersten Blick vergleichbares Projekt. Im Rahmen von Digitale Schiene Deutschland zielt es darauf ab, automatisierte Betriebsabläufe im Schienenverkehr zu entwickeln und zu erproben. Dabei werden modernste Technologien und Kommunikationssysteme eingesetzt, um den sicheren und effizienten, nahezu fahrerlosen Zugbetrieb in unterschiedlichen Einsatzszenarien zu realisieren. Das Projekt leistet einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung der Eisenbahn, indem es innovative Steuerungs- und Sicherheitskonzepte integriert, die die Weichen für zukünftige automatisierte Zuglösungen stellen.

Die Grundlage ist jedoch eine mit ETCS ausgerüstete Infrastruktur, sodass die Einführung gegenüber SAMU als langsamer zu erwarten ist. Auch ist die Zielgruppe zumindest teilweise das Segment der Neufahrzeuge, was den Zielen von SAMU entgegensteht.

6. Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?

Wie oben dargelegt, ist eine universelle Steuerung der Fahrzeuge über die Mehrfachtraktionsschnittstelle aufgrund zu hoher Variabilität der Software nicht zu erwarten. Stattdessen sind baureihenspezifische Anpassungen nötig.

Weiterhin wurde wie oben begründet auf das automatische Auf- und Abrüsten sowie die Nutzung von Open Data im Rahmen der Fahrwegsplanung verzichtet.

7. Fortschreibung des Verwertungsplans

Aufgrund der im Projektverlauf offenbar gewordenen Herausforderungen der Schnittstelle – diese war aufgrund der vorliegenden Normierung als deutlich normkonformer erwartet worden – ist eine Umsetzbarkeit im geplanten Zustand ohne Beteiligung der Fahrzeughersteller fraglich. Dennoch erregt das Projekt großes Interesse bei betriebsnahen Eisenbahner:innen.

Es sind Folgeprojekte geplant, die

a) Die Nachrüstung von Automatisierungslösungen im Straßenbahnbereich in bestehende Fahrzeuge sowie
b) Die Teilfunktionen und die Kommunikation über einen Linienleiter, ggfs. mit Remote Train Operation,

zum Ziel haben.

Dazu beigetragen haben die Veröffentlichung, die Vorträge sowie der Messeauftritt . Im Berichtszeitraum wurden folgende Beiträge veröffentlicht:

Babilon, K., Schmidt, B. D., Pfaff, R. Decoupled integration of automation functions for non-productive operation - A concept for the integration of assistance functions into existing vehicles and infrastructure maintaining homologation. Proceedings IRSA, Aachen, 2023.

Pfaff, R., Schmidt, B. Kleiner Aufwand, große Wirkung − Mit SAMU Nebenfunktionen automatisieren. Der Nahverkehr, 1+2, 2024, S.66 – 69.

Das Projekt wurde mit einem funktionstüchtigen Exponat, dass die Fahrzeugeinheit darstellt, auf dem Gemeinschaftsstand des VDV während der Innotrans im September 2024 ausgestellt. Es gab gutes Interesse und viele wertvolle Hinweise aus der Praxis.

Abbildung 12 Exponat zu SAMU auf der Innotrans 2024

Im November 2024 wurde SAMU einschließlich des Demonstrators auf dem EBL-Symposium des Verbands Deutscher Eisenbahnfachschulen vorgestellt. Hier gab es ebenfalls ein großes Interesse.

Referenzen

[1] Bombardier Talent 2, online, https://de.wikipedia.org/wiki/Bombardier_Talent_2, abgerufen am 22. 4. 2024

[2] DIN EN 16019:2014-06, Bahnanwendungen - Automatische Kupplung - Leistungsanforderungen, spezifische Schnittstellengeometrie und Prüfverfahren

[3] DIN EN 62267 VDE 0831-267:2010-07, Bahnanwendungen - Automatischer städtischer schienengebundener Personennahverkehr (AUGT) – Sicherheitsanforderungen

[4] Pfaff, R. Braking distance prediction for vehicle consist in low-speed on-sight operation: a Monte-Carlo approach. Rail. Eng. Science, 2023

[5] DIN VDE V 0831-103 VDE V 0831-103:2020-09, Elektrische Bahn-Signalanlagen, Teil 103: Ermittlung von Sicherheitsanforderungen an technische Funktionen in der Eisenbahnsignaltechnik, 2020.