

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

30/11/2018

Projekttitle:

Forschung für sichere und zuverlässige autonom fahrende Regionalzüge auf frei zugänglichen Strecken

Projektnummer:

848896

Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

| | |
|------------------------------------|---|
| Ausschreibung | 01. Ausschreibung Energieforschungsprogramm |
| Projektstart | 01/09/2015 |
| Projektende | 31/08/2018 |
| Gesamtprojektdauer (in Monaten) | 36 Monate |
| ProjektnehmerIn (Institution) | FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH |
| AnsprechpartnerIn | FH-Prof. DI Dr. Burkhard Stadlmann |

Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

| | |
|-------------|---|
| Postadresse | Stelzhamerstraße 23 4600 Wels Austria |
| Telefon | +43 5 0804 43420 |
| Fax | +43 5 0804 943420 |
| E-mail | burkhard.stadlmann@fh-wels.at |
| Website | https://forschung.fh-ooe.at/bahnautomatisierung-und-verkehrstelematik/ |

Forschung für sichere und zuverlässige autonom fahrende Regionalzüge auf frei zugänglichen Strecken

autoBAHN2020

AutorInnen:

Burkhard Stadlmann, FH OOE

Franziska Cecon, FH OOE

Christian Zinner, Austrian Institute of Technology

Christian Biester, Siemens AG

Oliver Gebauer, GeoSpy Aerial Imaging & Mapping e.U.

Laurenz Neumann, Stern & Hafferl GmbH

Peter H. Fischer, ZT-Büro Fischer

1 Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Inhaltsverzeichnis..... | 5 |
| 2 | Einleitung | 6 |
| 2.1 | Aufgabenstellung | 6 |
| 2.2 | Einordnung in das Programm und dessen Ausschreibungsziele | 6 |
| 3 | Inhaltliche Darstellung der Ergebnisse..... | 7 |
| 3.1 | Hinderniserkennung | 7 |
| 3.1.1 | Anforderungen an die Hinderniserkennung | 7 |
| 3.1.2 | Sensorik der Hinderniserkennung | 8 |
| 3.1.3 | Sensorfusion und Objektklassifikation | 13 |
| 3.1.4 | Streckenatlas | 14 |
| 3.2 | Systemsicherheit und Zulassung | 15 |
| 3.2.1 | Betriebsprozesse | 16 |
| 3.2.2 | Gesetzliche und Normative Grundlagen | 17 |
| 3.2.3 | Risikoanalyse | 19 |
| 3.2.4 | Systemzulassung | 23 |
| 3.2.5 | Fahrstrategie mit Reaktionsmodell | 26 |
| 3.3 | Felddemonstrator und Laborsimulator | 27 |
| 3.3.1 | Felddemonstrator | 28 |
| 3.3.2 | Laborsimulator | 29 |
| 3.4 | Begleitforschung | 31 |
| 3.4.1 | Ziele der Begleitforschung | 31 |
| 3.4.2 | Simulation und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung..... | 31 |
| 3.4.3 | Akzeptanzstudie..... | 35 |
| 4 | Zusammenfassung und Ausblick | 38 |
| 5 | Literaturverzeichnis | 39 |
| 6 | Anhang..... | 41 |
| 6.1 | Tabellenverzeichnis: | 41 |
| 6.2 | Abbildungsverzeichnis: | 41 |
| 7 | Kontaktdaten | 43 |

2 Einleitung

Um die Energiedienstleistung „Transport von Personen mit Schienenfahrzeugen“ auf Nebenstrecken attraktiver und energieeffizienter zu machen, soll ein autoBAHN-System mit Hilfe von selbstfahrenden, autonomen, kleineren Triebwagen auf bestehenden, frei zugänglichen und einspurigen Regionalbahnstrecken ein Verkehrsangebot mit hoher Taktdichte ermöglichen. Ohne physische Absperrung der Gleise ist eine zuverlässig funktionierende, IT-basierte Hindernis- und Gefahrenerkennung für jedes Fahrzeug und eine Fahrzeug-Koordinationskomponente erforderlich.

autoBAHN2020 baut auf zwei vorangegangenen Forschungsprojekten auf, im Rahmen derer auf der Traunseebahn (Strecke Gmunden – Vorchdorf) ein Triebwagen versuchsweise mit Sensoren ausgerüstet wurde und erste Konzepte einer Steuerung für automatisches Fahren auf einer Regionalbahnstrecke ausgearbeitet wurden.

2.1 Aufgabenstellung

Die Ziele von autoBAHN2020 sind, fehlende Komponenten und Prozesse für ein technisches autoBAHN-Demonstratorsystem zu erforschen und zu testen. Die daraus abgeleiteten Aufgabengebiete von autoBAHN2020 sind

- (1) eine signifikante Weiterentwicklung der Hinderniserkennung in Bezug auf Robustheit und Zuverlässigkeit,
- (2) Untersuchungen zu den Themen Systemsicherheit, Risikoanalyse, Betriebsprozesse, Fahrstrategie autonom fahrender Züge und dem Erreichen einer Systemzulassung
- (3) Schaffung eines Felddemonstrators und eines Laborsimulators zum Testen der Abläufe,
- (4) begleitende Untersuchungen zu den Themen Akzeptanz durch die Benutzer und Wirtschaftlichkeit eines Systems autoBAHN.

2.2 Einordnung in das Programm und dessen Ausschreibungsziele

Das Projekt autoBAHN2020 soll einen Beitrag im Themenfeld „Energieeffiziente Produkte und Systemlösungen“ einen Beitrag leisten und erfüllt damit die Ausschreibungsziele.

Das Ergebnis von autoBAHN soll ein äußerst energieeffizientes Transportlösungskonzept im Umfeld der Regionalbahnen sein. Mit diesem können im Zeitraum von 30 Jahren mindestens 3 Mio. Tonnen CO₂ in Österreich, verglichen zu aktuellen Transportsystemen, eingespart werden. Das autoBAHN System

sollte auf bestehende Schieneninfrastruktur setzen, um eine gute Wirtschaftlichkeit zu erreichen und die Leistbarkeit von nachhaltiger Energie und Energietechnologien zu erhöhen.

3 Inhaltliche Darstellung der Ergebnisse

3.1 Hinderniserkennung

3.1.1 Anforderungen an die Hinderniserkennung

Die Anforderungen an die Hinderniserkennung im Rahmen des Projektes autoBAHN2020 sind:
(1) Reduktion der Falschmeldungen False Positives: Das bei Projektbeginn verfügbare Subsystem Sensorfusion erzeugte zu viele False Positives aus unterschiedlichsten Gründen. Als False Positives werden gemeldete Fehler bezeichnet, die in Wirklichkeit keine sind. Das vorangegangene Forschungsprojekt hat gezeigt, dass die eingesetzte Sensorkombination noch nicht optimal ist. 360°-Laserscanner mit rotierendem Scankopf haben sich z.B. für die speziellen Anforderungen im Bahnumfeld als vergleichsweise wenig effektiv erwiesen.

(2) Ein weiterer bedeutender Einfluss auf die Hinderniserkennung stellt die Bestimmung der eigenen Fahrzeugposition dar. Longitudinale Positionsabweichungen entlang der Strecke führen, wie in Abbildung 1 dargestellt, zu einer lateralen Abweichung bei der Bestimmung des Fahrwegverlaufs in Kurven. In Folge dessen, können Objekte als im Lichtraum befindlich erkannt werden, obwohl sie sich außerhalb befinden (eine mögliche Ursache für False Positives) bzw. kann auch der gegenteilige Fall eintreten. Ähnliche Probleme hinsichtlich der Abschätzung des Fahrzeugwegs entstehen auch aufgrund von Bewegungen der Sensoren relativ zum Fahrweg aufgrund der Fahrzeugfederung.

(3) Die Robustheit der Hinderniserkennung bei verschiedenen Wettersituationen ist zu erhöhen. Es sind noch längst nicht alle möglichen Witterungs- und Umweltbedingungen abgedeckt. Durch Sammeln zusätzlicher Testdaten wie z.B. unterschiedliche Lichtverhältnisse über Tages- und Jahreszeiten sowie diverse Wetterbedingungen wie Nebel, Regen, Schneefall, soll der Abdeckungsgrad dieser äußeren Bedingungen vergrößert werden.

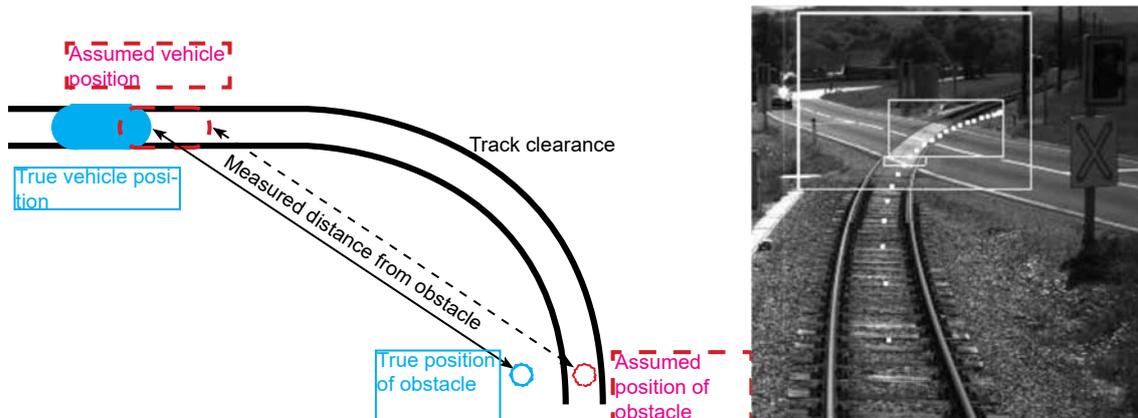


Abbildung 1: Fehlverhalten der Verlaufsschätzung bei Ungenauigkeiten der Navigation.

(4) Es soll eine Objektklassifikation und Verhaltenseinschätzung eingeführt werden: Bestehende Sensorsysteme verfügen nach wie vor nicht über die Fähigkeit eines wachsamem Triebfahrzeugführers Objekte zu klassifizieren und deren Verhalten im aktuellen Kontext korrekt zu interpretieren. Ein erfolgreiches autoBAHN System muss über die derzeitige Vorgehensweise zur Unterscheidung von Objekten zu anderen Objekten mittels räumlicher Schwellwerte hinauswachsen und Objekte anhand ihrer geschätzten Bewegung und Klassifikation bewerten.

3.1.2 Sensorik der Hinderniserkennung

Im Projekt wurden die Entwicklung, der Aufbau und die Evaluierung einer innovativen Fahrzeug Umfeld Sensorik vorangetrieben. Die Zielsetzung bestand in der Verbesserung der Störungsresistenz und der Zuverlässigkeit der Erkennung von Hindernissen, welche ein Kollisionsrisiko für den Zug darstellen. Ein Schwerpunkt war die Erforschung von kamerabasierten Methoden der 3D Umfeld Rekonstruktion, u.a. durch Verwendung einer Nachtsicht IR-Stereovision Sensorik, eine Verbesserung der Sensorfusionsalgorithmen und der Aufbau eines modularen Sensorframeworks bestehend aus mehreren unterschiedlichen Sensormodalitäten (Tageslichtkameras, IR-Kameras, Laserscanner, Radar, Ultraschall). Weitere Inhalte waren eine Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Umgebungsbedingungen (Licht- u. Wetterverhältnisse) auf die einzelnen Sensormodalitäten des Hinderniserkennungssystems.

Auf Basis der Erfahrungen der Vorprojekte und der neuen Zielsetzungen wurden geeignete Sensoren zur Unterstützung der Hinderniserkennung ausgewählt. Insgesamt wurden in der finalen Version acht Sensoren verwendet (siehe Abbildung 2).

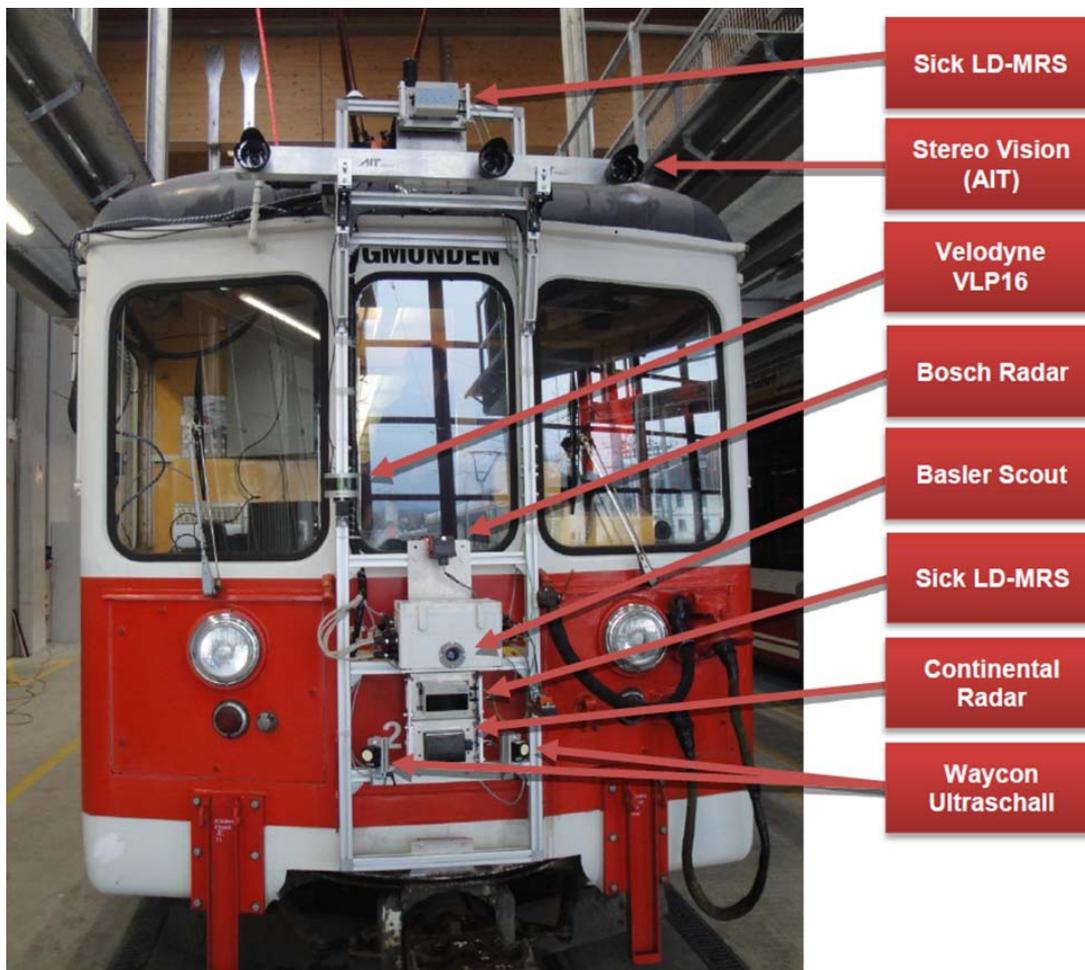


Abbildung 2: Testfahrzeug mit Hauptframe, an welchem die Sensoren befestigt sind.

Laserscanner und Radar

Durch den Einsatz von zwei Laserscannern mit sich überlappenden Arbeitsbereichen konnte eine sehr gute Abdeckung des Gleisbereiches erzielt werden (siehe Abbildung 3). Diese Sensorkombination vermeidet die technischen Nachteile des früher verwendeten 360° Sensors und ist außerdem wirtschaftlich deutlich günstiger. Bei einigen Testfahrten wurde zusätzlich noch ein 16 Ebenen Scanner verwendet.

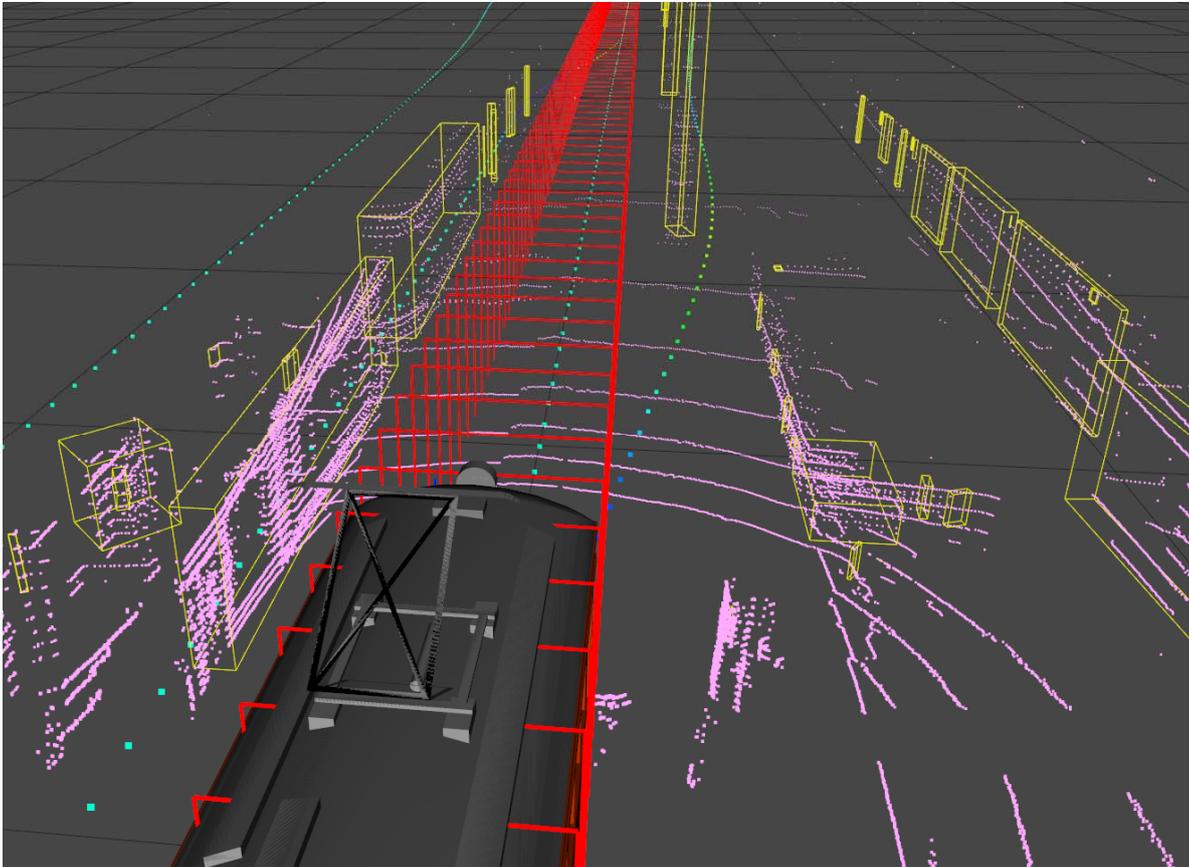


Abbildung 3: LiDAR Objekterkennung.

Die Radarsensoren sind wichtige Sensoren für den Schlechtwetterfall. Die Probleme der zahlreichen Artefakte durch die vielen Eisenteile im Bahnbereich konnten deutlich reduziert werden, hier ist jedoch auch noch weiterer Forschungsbedarf gegeben.

Bildgebende Sensorik

Im Bereich der kamerabasierten Sensorik für die 3D Umfeld Erfassung wurden Stereo-Vision Verfahren mit Multikameraanordnungen weiterverfolgt und ausgebaut. Dazu wurden im Projektverlauf Funktionsprototypen in unterschiedlichen Ausführungen am Fahrzeug aufgebaut und für die Sensordatensammlung sowie Erprobungen in einem Live-Betrieb eingesetzt.

Im Ergebnis konnte mit den neuen Versuchssystemen die angestrebten Verbesserungen bei der bildgebenden Sensorik erzielt werden, wie z.B. Erhöhung von Erkennungsreichweite und Abtastfrequenz, Verminderung der Reaktionszeit und Verkleinerung der für eine Detektion erforderlichen Objektgröße.

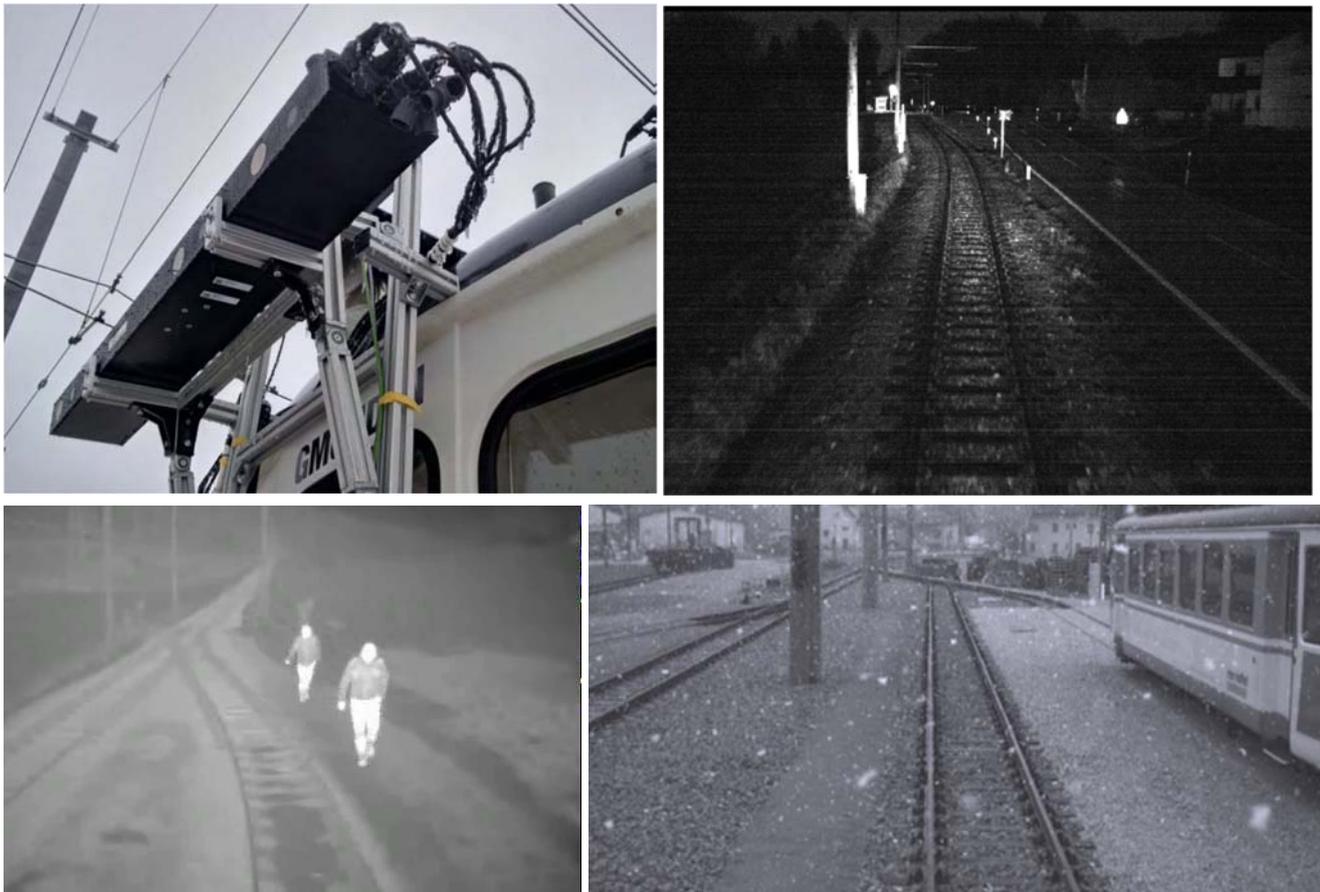


Abbildung 4: Bildgebende Sensorik und herausfordernde Umgebungsbedingungen. Oben links: Forschungsaufbau für ein Multikamerasystem; Oben rechts: bei Nacht; Unten links: Aufnahme im thermischen Infrarot; Unten rechts: Testsituation bei starkem Schneefall

Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

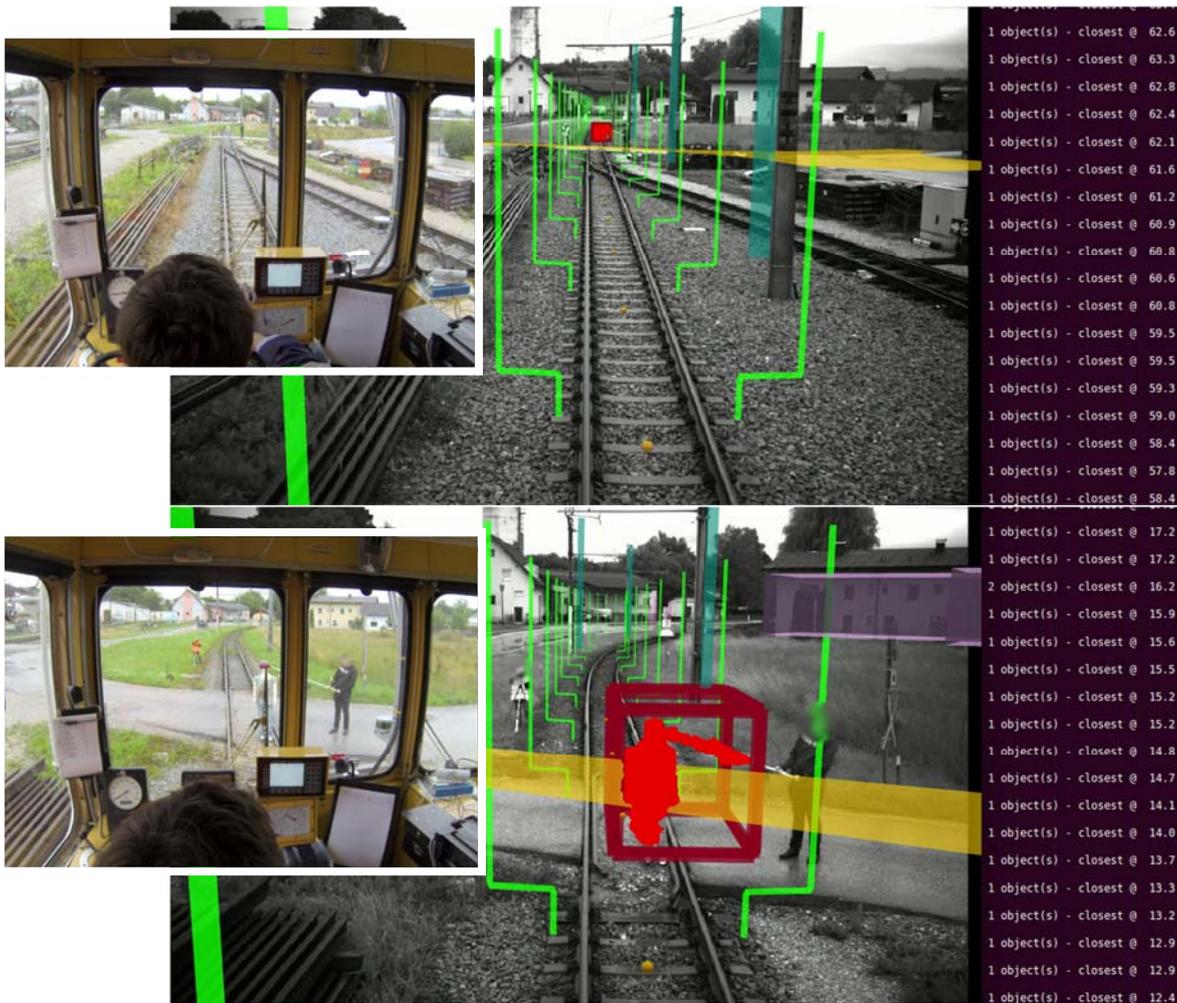


Abbildung 5: Visualisierung der Stereokamera-basierten Hinderniserkennung (rechte Spalte) und einer Actionkamera aus dem Fahrerstand (linke Spalte) bei der Annäherung an einen Testdummy. Oben: Kontinuierliche Erkennung bei Annäherung an einen Testdummy. Unten: Erkennung nach dem automatischen Stopp.

3.1.3 Sensorfusion und Objektklassifikation

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten war die Umsetzung einer Sensorfusion auf Objektebene. Dabei werden die von den einzelnen Sensoren gelieferten Objektinformationen zusammengeführt (siehe Abbildung 6).

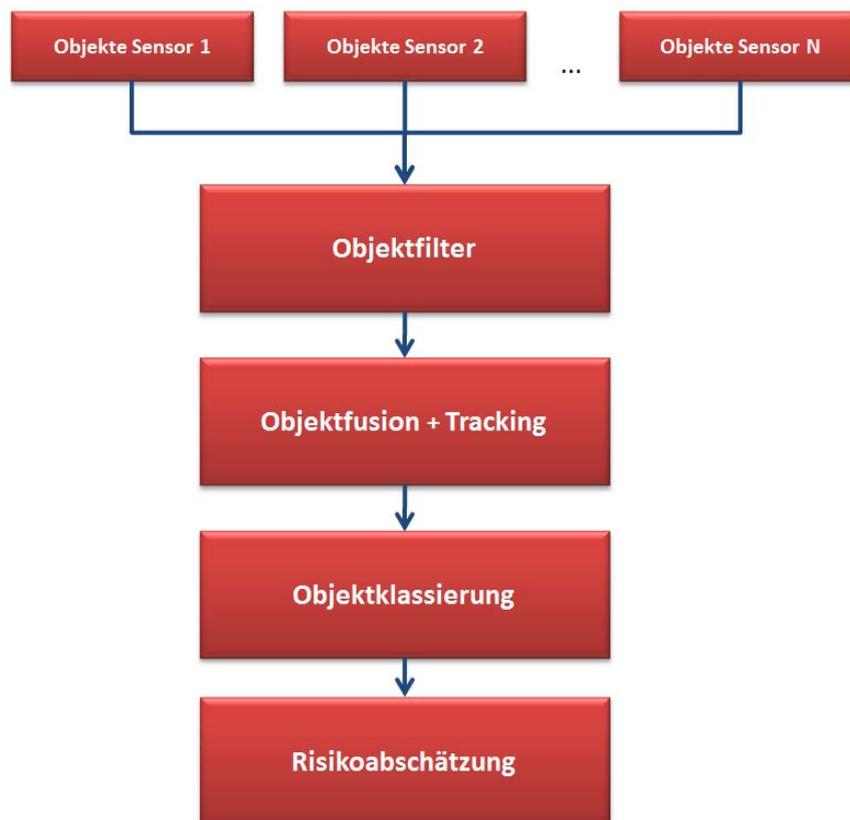


Abbildung 6: Objekthandling von der ersten Detektion bis zur Aufbereitung für das Reaktionsmodell.

Durch die verbesserte Sensorfusion, Verwendung der stereo-vision Kamera und Optimierungen an der Datenverarbeitung, konnte eine hohe Zuverlässigkeit bei der Erkennung und dem Tracking von Objekten im Sicherheitsbereich erreicht werden.

Die Detailarbeiten zu den verschiedenen 3D-Sensormodalitäten und zu Fusionsaspekten lieferten eine wichtige Grundlage für die Erstellung eines Bewertungsschemas für Sensoren, welches erstmals die relevanten Eigenschaften für eine Anwendung auf Schienenfahrzeugen betrachtet (Abbildung 7).

| criteria rating: 1: weak / 4: very good | LiDAR | visual stereo camera | thermal infrared stereo camera | Radar (near range / long range) | Ultrasonic sensor (array) |
|--|-------|-------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------|
| horizontal angular resolution | 4 | 4 | 3 | 1 | 2 |
| vertical angular resolution | 4 | 4 | 3 | 1 | 1 |
| distance resolution | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 |
| horizontal coverage / field-of-view | 4 | 3 | 2 | 3/2 | 3 |
| vertical coverage / field-of-view | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| coverage of object types & materials | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| support for tracks detection | 2 | 4 | 3 | 1 | 1 |
| support for object classification | 2 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| tracking of relative speed of object (lateral) | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| tracking of relative speed of object (longitudinal) | 3 | 3 | 2 | 4 | 1 |
| robustness to environmental conditions: bright sun / night | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 |
| robustness to environmental conditions: rain, snow, fog | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 |
| estimate for useable range (meter) | ~100 | ~100 | ~60 | ~40 / ~150 | ~5 |

Abbildung 7: Bewertungsschema für 3D Sensoren zur Hindernisdetektion auf Schienenfahrzeugen (veröffentlicht in (Stadlmann B., 2018))

Für die Klassifizierung der erkannten Objekte, wurden sechs Kategorien definiert, die sich in Größe und Verhalten unterscheiden. Die Klassifizierung erfolgt dabei durch eine Support-Vector-Machine. Damit können deutlich bessere Aussagen sowie Vorhersagen über das Objektverhalten gemacht werden.

3.1.4 Streckenatlas

Die im Projekt umgesetzte Lösung für einen on-board Streckenatlas ermöglicht die korrekte Repräsentation der Geometrie und diverser Attribute zum Streckenverlauf. Im Zusammenspiel mit der Zugeigenortung ist dies die Voraussetzung für eine vollautomatische Steuerung des Fahrzeugs. Eine weitere wichtige Anwendung liegt in der Extraktion des vorausliegenden Fahrwegverlaufs aus dem Streckenatlas, da dies ein notwendiger Input für die Hinderniserkennung ist. Es wurde beispielhaft eine Kartierung von Elementen des nahen Umfeldes vorgenommen, also jene Bereiche, die von den Sensoren des Fahrzeugs auch erfasst werden können. Abbildung 8 gibt ein Beispiel für die

Funktionalität des Streckenatlasses, indem georeferenzierte Objekte wie Oberleitungsmasten, Bahnsteige, Kreuzungsbereiche, Gebäude und Wälder im laufenden Betrieb in Relation zum Schienenfahrzeug gesetzt werden (links im on-board Kamerabild, rechts in der Luftaufnahme). Die Streckenatlas-Module stellen zusätzlich den für eine effektive Hinderniserkennung essenziellen Fahrwegverlauf bereit. Die Darstellung zeigt auch das Potential des gewählten Ansatzes auf, dass zukünftige autonome Zugsteuerungen sich abhängig vom Kontext der jeweiligen Umgebung angepasst verhalten könnten.

Gebäude

Bahnübergang oder Bahnsteig

Wald

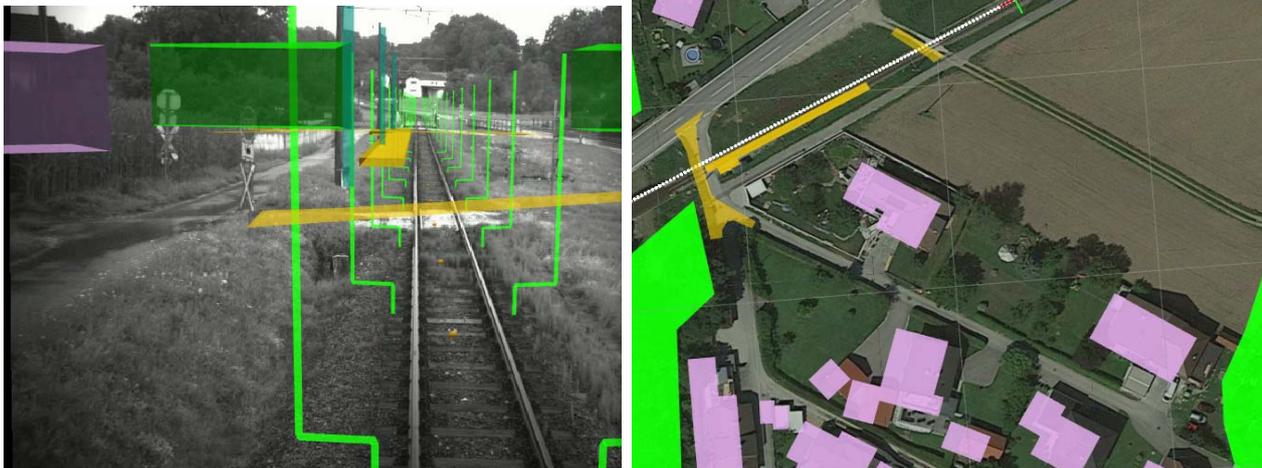


Abbildung 8: Georeferenzierte Objekte in zwei unterschiedlichen Darstellungen. Links: 6D Pose in Weltkoordinaten wird verwendet, um die Objekte in ein aktuelles Kamerabild zu projizieren. Rechts: Luftbild überlagert mit den Objekten. Bei genauerer Betrachtung ist der Versatz zwischen den Objekten und dieser Luftbildquelle erkennbar – die Objekte wurden offensichtlich anhand einer anderen Quelle kartiert.

3.2 Systemsicherheit und Zulassung

Die Aufgabenstellungen in diesem Bereich sind: (1) Die Anforderungen an die Systemsicherheit müssen gemäß den einschlägigen Richtlinien erarbeitet werden, sodass sie von Zulassungsstellen akzeptiert werden. Dies beinhaltet auch die Klärung der relevanten gesetzlichen und normativen Grundlagen. (2) Es müssen die für einen automatischen Betrieb von Regionalbahnen notwendigen Abläufe zur

Ermöglichung eines sicheren und zuverlässigen autonomen Zugverkehrs spezifiziert werden. Diese Prozesse müssen sowohl den regulären Betrieb als auch etwaige Notfallszenarien sowie Störungen abdecken. (3) Für alle weiteren Arbeiten in Richtung Zulassung muss eine passende und belastbare Risikoanalyse erstellt werden. (4) Es sollen die notwendigen prozessualen und technischen Zulassungsvoraussetzungen geklärt werden. (5) Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Sicherheitsanalyse und der Hinderniserkennung muss für einen autonom fahrenden Zug auf einer Regionalstrecke eine Fahrstrategie entwickelt werden.

3.2.1 Betriebsprozesse

Zur Systemsicherheit wurden für den Betrieb und das Leitsystem erforderliche Prozesse des Fahrzeugumfeldes, des Umfeldes der Zentrale und für die Kommunikation erfasst und tabellarisch gelistet. Die identifizierten Prozesse wurden geordnet für den bestehenden „manuellen“ Betrieb, mittels einer semiformalen grafischen Darstellung veranschaulicht und zusätzlich verbal beschrieben.

In nächsten Schritt wurden dann die für den „manuellen“ Betrieb beschriebenen Prozesse, welche vollständig vom Betriebspersonal abhängig sind, auf einen Betrieb ohne Triebfahrzeugführer und Zugbegleiter adaptiert. Dabei wurden die Prozesse wiederum mit der semiformalen grafischen Darstellung veranschaulicht und zusätzlich verbal beschrieben.

Die folgende Grafik (Abbildung 9) veranschaulicht exemplarisch den Prozess „Beobachtung der Strecke im autonomen Fahrbetrieb“ in vereinfachter Form. Der Lichtraum des Zuges wird kontinuierlich mit Hilfe komplementärer und redundanter Hard- und Software erfasst.

Solange der Lichtraum frei ist, kann der Zug mit erlaubter Geschwindigkeit fahren. Wird ein Objekt im Lichtraum detektiert, wird versucht das Objekt zu klassieren. Je nach Objektklasse und Kollisionsrisiko muss das Zugsystem die Vorwärtsbewegung des Zuges beeinflussen. Neben Objekten im Lichtraum muss die Lichtraumüberwachung auch Objekte und deren Bewegungstendenz außerhalb des Lichtraumes berücksichtigen. Je nach Objektklasse und Bewegungstendenz muss nun das Zugsystem wieder die Vorwärtsbewegung des Zuges beeinflussen.

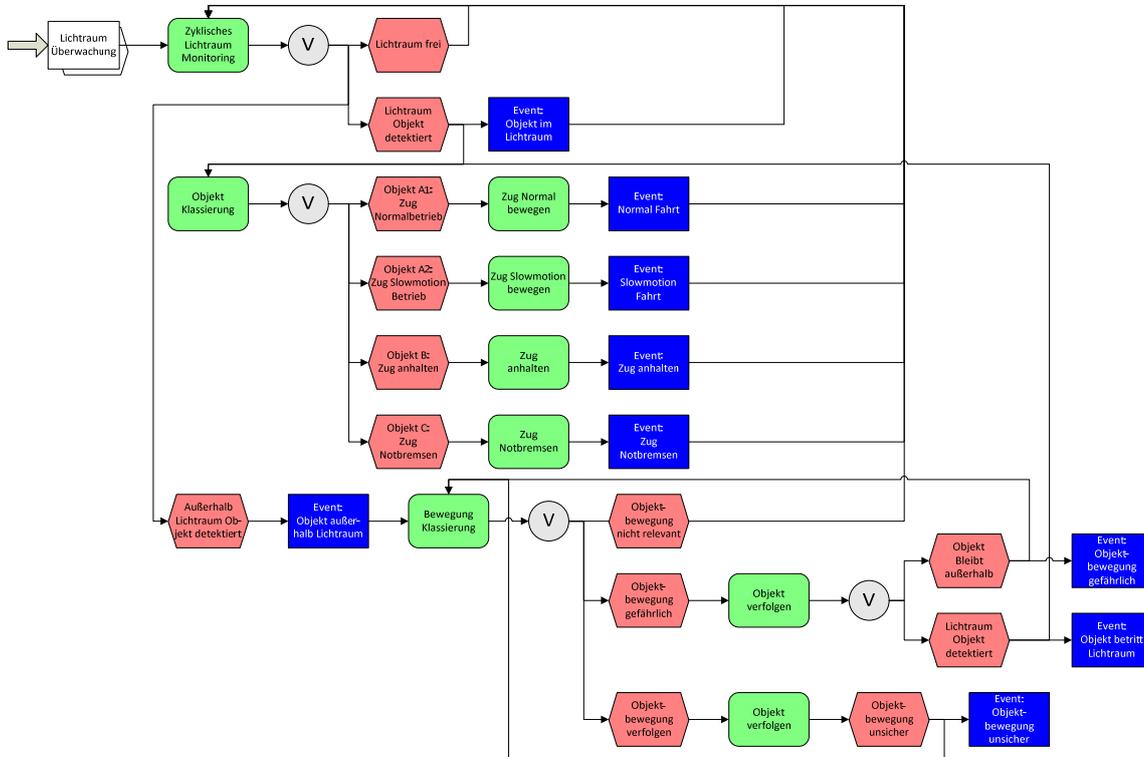


Abbildung 9: Prozess: Beobachtung der Strecke im autonomen Fahrbetrieb.

3.2.2 Gesetzliche und Normative Grundlagen

Das Arbeitspaket hatte die Ziele, die prozessualen Grundlagen zu liefern, um die autonom fahrenden Züge sicher und wirtschaftlich zu betreiben. Zusätzlich wurden die dafür notwendigen Vorbereitungen für eine mögliche Zulassung des Systems definiert und dokumentiert.

Dazu wurden folgende Gesetze und Verordnungen bezüglich etwaige Hindernisse für eine Zulassung analysiert:

| | |
|---------|---|
| [EisbG] | Bundesgesetz über Eisenbahnen, Schienenfahrzeuge auf Eisenbahnen und den Verkehr auf Eisenbahnen (Eisenbahngesetz 1957 - EisbG), in der Fassung vom 23.2.2016 |
|---------|---|

Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

| | |
|---------------|--|
| [EisbKrV] | 216. Verordnung der Bundesministerin für Verkehr, Innovation und Technologie über die Sicherung von Eisenbahnkreuzungen und das Verhalten bei der Annäherung an und beim Übersetzen von Eisenbahnkreuzungen (Eisenbahnkreuzungsverordnung 2012 - EisbKrV) |
| [ASchG] | Bundesgesetz über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit (ArbeitnehmerInnenschutzgesetz – ASchG) in der Fassung vom 29.11.2018 |
| [AVO Verkehr] | Verordnung des Bundesministers für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz über die Berücksichtigung der Erfordernisse des ArbeitnehmerInnenschutzes und über den Nachweis der Einhaltung in Genehmigungsverfahren des Verkehrswesens (ArbeitnehmerInnenschutzverordnung Verkehr 2017 – AVO Verkehr 2017), Fassung vom 29.11.2018 |
| [EisBBV] | 398. Verordnung des Bundesministers für Verkehr, Innovation und Technologie, mit der die Verordnung über den Bau und Betrieb von Eisenbahnen (Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung - EisBBV) erlassen wird sowie die Verordnung über den Bau, den Betrieb und die Organisation von Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung 2003 – EisbVO 2003) geändert wird |
| [StrabVO] | 127. Verordnung des Bundesministers für Verkehr, Innovation und Technologie, mit der die Straßenbahnverordnung 1999 geändert wird (1. StrabVO-Novelle) |
| [EBEV] | 128. Verordnung des Bundesministers für Verkehr, Innovation und Technologie über die für den Bauentwurf von Eisenbahnanlagen und nicht ortsfesten eisenbahnsicherungstechnischen Einrichtungen erforderlichen Unterlagen (Eisenbahn-Bauentwurfsverordnung - EBEV) |

| | |
|----------|--|
| [EisbAV] | Verordnung des Bundesministers für Wissenschaft und Verkehr über den Schutz von ArbeitnehmerInnen im Bereich von Gleisen (Eisenbahn-ArbeitnehmerInnenschutzverordnung - EisbAV) StF: BGBl. II Nr. 384/1999 in der Fassung vom 10.12.2018 |
|----------|--|

Tabelle 1: Liste an Verordnungen

Diese Analyse war unter anderen die Grundlage für den Dialog mit dem BMVIT. Als kritisch wurde dabei der §114 EisBBV eingestuft, da der von einer Besetzung oder Fernsteuerung des Triebfahrzeugs ausgeht. Hier ist noch ein gewisser Aufwand notwendig um den Automatikbetrieb im Sinne einer Fernsteuerung darzustellen.

3.2.3 Risikoanalyse

3.2.3.1 Ausgangslage und Beispielszenarien

Die Unfallwahrscheinlichkeit bzw. Tötungswahrscheinlichkeit beim Betrieb von Schienenfahrzeugen ist, abgesehen von technischen Gebrechen, in erster Linie von Stress und Auslastung (vergleiche Untersuchungen Hinzen ETR1966 Nr.10 S623-630) des Triebfahrzeugführers bzw. von Personen im Gleisbereich abhängig.

Um eine Vergleichbarkeit mit autonomen Systemen zu schaffen, wurden Wahrscheinlichkeitsbäume für diverse Arten von Gefährdungen erstellt. Anhand dieser kann die Wahrscheinlichkeit des Eintretens bestimmter Szenarien, sowie die Wahrscheinlichkeiten für mögliche Ausgänge, approximiert werden. Das Modell berücksichtigt das Streckenprofil, verschiedene Umweltbedingungen und, für den Vergleich mit dem bestehenden System, verschiedene Stresssituationen des Triebfahrzeugführers.

Die Wahrscheinlichkeit technischer Gebrechen wird für beide Fälle als ident angenommen.

Es handelt sich um ein dynamisches Modell, welches durch Änderung oder Ergänzung der Parameter angepasst werden kann. So kann das Modell den Entwicklungen der Hard- und Software folgend, die Auswirkungen etwaiger Änderungen vorhersagen bzw. bewerten. Umgekehrt ermöglicht das Modell eine Analyse, welche Änderungen der Systemparameter erforderlich sind, um ein gewünschtes Verhalten des Gesamtsystems zu erreichen. Dies erlaubt es selektiv Schwächen des Systems bei bestimmten Bedingungen zu erkennen und für diese Situationen gezielt Verbesserungen durchzuführen. Um die

Folgen eines etwaigen Ereignisses abschätzen zu können, wird die Kollisionsgeschwindigkeit berechnet und aus dieser die Unfallfolgen, basierend auf Unfallstatistiken (z.B. BMVIT, Wiener Linien), abgeleitet.

Folgende Gefährdungsszenarien wurden untersucht:

- Fußgänger im Gleis
- Passagier über der Gefahrenlinie am Bahnsteig
- Blockade der Bahnstrecke

In den ersten beiden Szenarien, in denen weitere Personen und deren Verhalten involviert sind, wurde auch deren Reaktion mit einer Wahrscheinlichkeit ins Ergebnis eingerechnet.

Folgende Umweltbedingungen wurden berücksichtigt:

- Tag
- Nacht (z.B. Videoanalyse nicht möglich)
- Nebel (z.B. keine Daten von Lasersensor)
- Tiefstehende Sonne (z.B. Kamera geblendet – keine Bildinformation)
- Schnee (z.B. Videoanalyse nicht möglich)

Unter den verschiedenen Umweltbedingungen haben die verwendeten Sensoren, deren Sichtweite normalerweise zwischen 50m und 100m liegt, spezielle Eigenschaften. Dies erfordert, die Situation am Gleis mit diesen unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten zu untersuchen. Weiters wurde die Anzahl der beförderten Personen bei gegebener Umweltbedingung und die Kollisionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Streckenprofils in die Berechnung der Tötungswahrscheinlichkeit einbezogen.

- Szenario 1 - Fußgänger am Gleis (autonomer Betrieb - Tag – gute Sicht)

Dieses Szenario tritt im Durchschnitt etwa einmal am Tag auf. Die Abschätzung beruht auf Gesprächen mit Triebfahrzeugführern einer Nebenbahn.

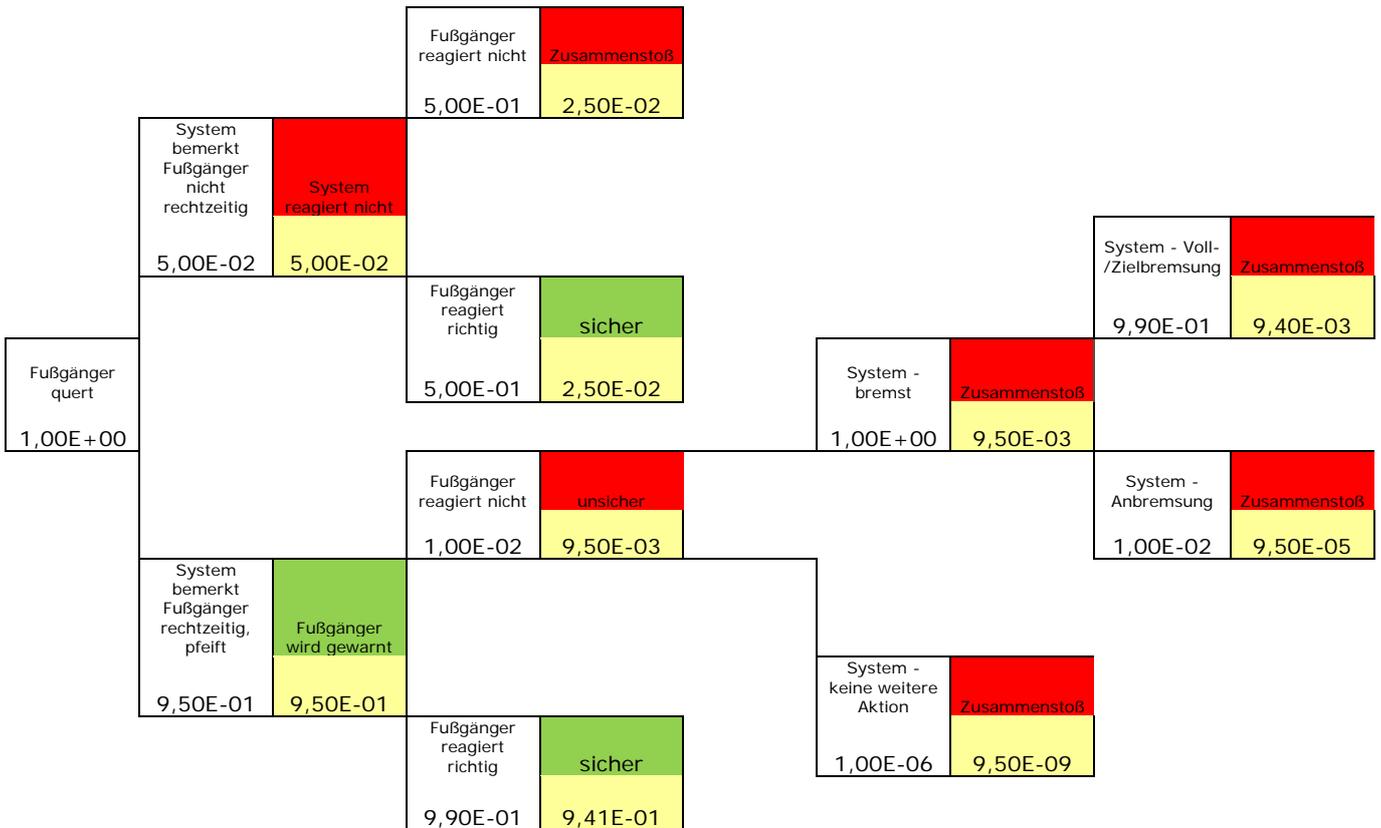
Im Wahrscheinlichkeitsbaum wird nun unterschieden, ob der Fußgänger vom System erkannt wird oder nicht. Die Erkennung schlägt in etwa 10% der Fälle fehl. Diese Annahme beruht auf den Ergebnissen der Testfahrten. Die Reaktion des Systems kann Schnellbremsung und ein Warnpfeiff sein. Da die Person auf Grund der Sichtverhältnisse (Verdeckung durch Gleisbogen) meist erst innerhalb des Bremsweges erkannt wird, ist der Warnpfeiff meist die einzig wirkende Gegenmaßnahme, um einen Vorfall zu vermeiden.

Entscheidend ist, ob die folgenden Aktionen der Person und des Systems eine Kollision verhindern können, oder ob es zu dieser kommt. Das System wurde dahingehend angepasst, dass die Schwelle für

Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

den Warnpfeiff sehr nieder angesetzt wurde, die Schwelle für das Einleiten einer Vollbremsung wurde höher angesetzt da diese betriebshemmend ist. Festzuhalten ist, dass der Aufenthalt von Personen im Gleis jedenfalls nicht erlaubt ist. Der Fall wurde trotzdem betrachtet da Personenunfälle von der Öffentlichkeit unabhängig vom Verschulden der betroffenen Person der Eisenbahn angelastet werden.



- Szenario 2 - Passagier über der Gefahrenlinie am Bahnsteig (autonomer Betrieb - Tag – gute Sicht)

Es gelten sinngemäß die gleichen Überlegungen wie bei Szenario 1

- Szenario 3 - Hindernis am Gleis (autonomer Betrieb - Tag – gute Sicht)

Im Falle eines Hindernisses am Gleis, kann eine Kollision meist nicht verhindert werden, da dieses statisch ist, und meist nicht früh genug für ein vollständiges Abbremsen erkannt werden kann.

Aktuell wird die Bremskurve anhand eines linearen Modells berechnet, dessen Eigenschaften durch die Technologie der Bremsen (elektrisch oder hydraulisch) beeinflusst werden. Durch das Einleiten einer Schnellbremsung können die Folgen des Ereignisses reduziert werden.

Im Falle eines Zusammenstoßes mit einem Hindernis oder einem anderen stehenden Zug ist, bei einer Geschwindigkeit von unter 60 km/h, eine tödliche Verletzung für einen Passagier im Zug eher unwahrscheinlich da die Züge sehr robust gegen diese Art von Kollision gebaut sind. Dies wurde durch eine gestufte, geschwindigkeitsabhängige Tötungswahrscheinlichkeit berücksichtigt.

Kollisionen zweier Züge wurden nicht weiter betrachtet da diese durch die Sicherungstechnik ausgeschlossen werden können und gegebenenfalls dieser zuzuschreiben wären.

3.2.3.2 Umweltbedingungen

Es wurden sechs Umweltbedingung modelliert, angepasst an die verwendeten Sensoren und deren Empfindlichkeit gegen Umwelteinflüsse. Die entsprechenden Stressfaktoren für die Triebfahrzeugführer wurden an diese Umweltbedingungen angepasst so dass für jede Umweltbedingung ein Vergleich zwischen dem Triebfahrzeugführer und dem automatischen System direkt möglich ist. Die Verteilung der verschiedenen Wettersituationen wurde aus der Wetter-Statistik (ZAMG) für die Strecke Vorchdorf – Gmunden abgeleitet.

Ein spezieller Fall ist die Fahrt gegen den Sonnenstand, dafür wurde auch die Fahrtrichtung des Zuges berücksichtigt.

Dabei wird für das automatische Fahren ein konservativer Ansatz gewählt, d.h. die für das neue System ermittelten Werte sind als worst-case Betrachtung zu verstehen.

Für den Triebfahrzeugführer wurden Standardwerte aus der Literatur und Werte aus den Erfahrungen der Gutachter verwendet.

Kombinationen ungünstiger Umweltbedingungen, z.B. Schneefall und Nacht, wurden nicht betrachtet. Es sind hier keine wesentlichen Änderungen der Ergebnisse zu erwarten, da meist eine Umweltbedingung dominiert. Eine solche Betrachtung könnte durch Erweiterung des Modelles auf mehr als sechs Umweltbedingungen durch die Einführung kombinierte Bedingungen als eigene Fälle berücksichtigt werden.

Das Risiko für Angestellte der Bahn im Zug, insbesondere den Triebfahrzeugführer, ist durch die Position im Zug höher als für Passagiere. Dieser Fall wurde nicht getrennt betrachtet, sondern in der Gesamttötungswahrscheinlichkeit mitberücksichtigt.

Verschubunfälle wurden nicht beurteilt. Es wird davon ausgegangen, dass Verschub entweder mit Triebfahrzeugführer oder mit ferngesteuerten Triebfahrzeugen durchgeführt wird.

Ein etwaiger Ausfall des Gesamtsystems oder der Sicherungsanlage muss vom System erkannt werden und es müssen entsprechenden Gegenmaßnahmen, i.d.R. eine Schnellbremsung, eingeleitet werden.

Die Wahrscheinlichkeit eines nicht erkannten Systemausfalls wurde pauschal berücksichtigt, sie hat für das Gesamtergebnis nur unwesentlichen Einfluss. Die Einführung externer Systeme zur Erkennung eines Systemausfalles (Watch Dog) wurde diskutiert, in der Modellierung aber nicht berücksichtigt.

Um die Verfügbarkeit zu erhöhen sind auch mehrkanalige Systeme (1+1 oder 2+1) möglich. Für diese Varianten sind derzeit eigene Modelluntersuchungen nicht sinnvoll da der Einfluss anderer Faktoren auf die Systemperformance weit höher sind. Verbesserungen der Verfügbarkeit führen beim derzeitigen System zu keinen wesentlichen Verbesserungen des Gesamtverhaltens.

3.2.3.3 Ergebnisse Risikomodell

- Zug mit Triebfahrzeugführer:

Es wurde ein Vergleich zwischen einem Triebfahrzeugführer geführten Zug und einem autonom geführten Zug durchgeführt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass, unter Berücksichtigung der zur erwartenden technischen Weiterentwicklungen, davon ausgegangen werden kann, dass ein autonom geführter Zug mindestens gleichwertig ist einem Zug, geführt durch einen Triebfahrzeugführer.

3.2.4 Systemzulassung

Mit der Darstellung der gesetzlichen Basis (siehe Abschnitt 3.2.2) wurde basierend auf dem Eisenbahngesetz (EisbG - BGBl. I Nr. 137/2015) und der dazugehörigen Sekundärlegistik und potenziell anzuwendender Normen untersucht, ob eine Zulassung für das System autoBAHN in Österreich möglich wäre.

Im 7. Hauptstück „Bau, Veränderung und Inbetriebnahme von Eisenbahnanlagen und nicht ortsfesten eisenbahnsicherungstechnischen Einrichtungen und Inbetriebnahme von Schienenfahrzeugen“ des

EisbG wird im §31 für Eisenbahnanlagen und §32 für Schienenfahrzeuge ausgeführt, dass die Eisenbahnanlage bzw. das Schienenfahrzeug dem Stand der Technik unter Berücksichtigung der Sicherheit und Ordnung des Betriebes der Eisenbahn zu entsprechen hat.

In dieser Formulierung ist nicht ganz klar, ob sie auf den Stand der Technik im Allgemeinen oder auf den Stand der Technik bezogen auf die Eisenbahntechnik abzielt. Auf jeden Fall wollte der Gesetzgeber mit dieser Formulierung verhindern, dass veraltete Produkte ins Feld gebracht werden. Das dies hier betrachtete System autoBAHN dem Stand der Technik im Allgemeinen entspricht, ist leicht nachzuvollziehen, da autonomes Fahren auf der Straße und in der Luftfahrt (insbesondere bei Drohnen) bereits in Erprobung bzw. im Einsatz ist. Auch entspricht es dem Stand der Technik bei Eisenbahnen, da dort zumindest bei U-Bahnen autonomes Fahren schon mehr als 10 Jahren im Einsatz ist oder es ist moderner, da solche Systeme bis jetzt auf Überlandbahnen noch nicht im Einsatz sind. Da aber der Gesetzgeber mit diesem Gesetz Innovationen nicht untersagen wollte, stellt dies kein Problem dar. Ob es der Sicherheit und der Ordnung des Betriebs der Eisenbahn entspricht, ist natürlich eine etwas diffizilere Frage.

Regelwerk für neue Systeme:

”Alle neuen spurgeführten Bahnsysteme müssen ein ”globales” Risikoniveau anbieten, das mindestens so gut ist, wie das, welches bei irgendeinem ausgeführten System angeboten wurde.”

Dies bedeutet, dass ein Referenzsystem benötigt wird, mit dem das neue System verglichen werden kann.

Referenzsystem

In Österreich darf bis 160 km/h ohne kontinuierliche Zugbeeinflussung gefahren werden und die Hinderniserkennung liegt dabei alleinig beim Tfzf (Triebfahrzeugführer). Dies gilt übrigens auch bei höheren Geschwindigkeiten.

Es wurde daher als Referenzsystem eine Strecke mit einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h angenommen.

Sichtweite

Es gibt wissenschaftliche Untersuchungen für Autos bei denen von einer maximalen Sichtweite von 400 m und einem Sichtwinkel von 100° nach links und von 90° nach rechts ausgegangen wird.

Dies ist auch in der Eisenbahnkreuzungsverordnung¹ 2012 so abgebildet. Diese maximale Sichtweite wird daher für die Zulassung als Referenz herangezogen.

¹ EisbKrV; BGBl. II Nr. 216/2012

Diese wird natürlich nur bei optimalen Bedingungen erreicht und es muss auch bedacht werden, dass die Topologie der Eisenbahnstrecken oft gar keine Sicht auf 400 m zulässt.

Beim System autoBAHN wird zurzeit von einer technischen Sichtweite von 100 m ausgegangen. Es ist daher der Nachweis zu führen, dass diese technische Sichtweite ausreichend ist. Dies erfolgt durch die erweiterte Risikoanalyse im Vergleich mit bisherigen Zugklassen, bei einer Sicht von 400 m. Bei diesem Vergleich zeigt sich, dass ein moderner Zug mit dem System autoBAHN mit 100 m Sicht beim Erreichen des Hindernisses eine geringere Geschwindigkeit aufweist als ein herkömmlicher Zug mit 400 m Sicht.

Ausblick

Die Reaktionen des autonomen Zuges (inkl. ihrer zeitlichen Vorgaben) müssen mit den Betreibern und der Behörde auf Basis der Risikoanalyse evaluiert werden.

Die vorläufige Risikoanalyse basiert auf einem Vergleich zwischen einer aktuellen Strecke mit einem Bestandtriebfahrzeug und einem Zug mit dem System autoBAHN. In der Risikoanalyse werden verschiedene Szenarien verglichen, z.B. Gute Sicht, Schlechte Sicht, Nacht. Die Risikoanalyse muss generalisiert werden für eine Strecke mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h. Das System autoBAHN basiert auf der Verwendung diversitärer Sensorik zur Hinderniserkennung. Dabei wurde neben der technischen Spezifikation auch auf ein akzeptables Kostenniveau geachtet. Es ist noch vertiefend darzustellen, dass eine Sichtweite von 100 m gegenüber der bisherigen Sichtweite von 400 m tolerierbar ist.

Es ist noch nachzuweisen, dass für ein solches System i.a. SIL 2 ausreichend ist (ggf. punktuell durch Verfahren oder diversitäre Ansätze mit einer Hazard Rate, welche besser als 10^{-7} /h ist)

Es müssen die Rahmenbedingungen definiert werden, unter denen das System als nicht deterministisches System inklusive Elementen der künstlichen Intelligenz betrieben werden darf.

Der Vollständigkeit halber wird hier angeführt, dass für Bereiche, die bei vergleichbaren Systemen bereits im Einsatz sind auch vergleichbare Lösungen implementiert werden bzw. diese Komponenten im System autoBAHN verwendet und nicht neu entwickelt werden. Das betrifft beispielsweise die Videoüberwachung im Fahrgastraum und um das Fahrzeug herum sowie Entgleisungsdetektoren. Diese Systeme wurden daher nicht betrachtet.

3.2.5 Fahrstrategie mit Reaktionsmodell

Bei autonom fahrenden Zügen auf frei zugänglichen Gleisen muss eine Fahrstrategie entwickelt werden, die einerseits unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Hinderniserkennung eine entsprechende Sicherheit aufweist, aber andererseits nicht bei jedem Hindernis sofort eine Notbremsung auslöst, da dann die Sicherheit der Passagiere im Zug erheblich gefährdet wäre.

Im Rahmen des Projektes autoBAHN2020 wurde daher ein Reaktionsmodell erarbeitet und im Demonstrator getestet, das für alle Kombinationen von Ergebnissen aus der Hinderniserkennung und den verschiedenen Fahrsituationen entsprechende Reaktionen des Fahrzeugs definiert. Damit ist unter Berücksichtigung der Erfahrungen bei einem Fahrbetrieb mit Triebfahrzeugführer und den Anforderungen aus Sicherheit der Passagiere und Sicherheit des Fahrbetriebs ein Handlungsmuster erstellt worden, das softwareseitig umsetzbar ist. Damit ist das Verhalten des autonom fahrenden Zuges transparent und nachvollziehbar gemacht worden. Das ist daher auch ein wichtiger Baustein für ein Zulassungsverfahren.

Die auf diesem Reaktionsmodell aufbauende Software steuert die Reaktionen des Zuges aufgrund von erkannten Hindernissen mit ihren jeweiligen Kollisionswahrscheinlichkeiten sowie den sonstigen strecken- und betriebsabhängigen Gegebenheiten. In Abbildung 10 wurde exemplarisch der Teil des Modells angeführt, der die Abfahrt eines Zuges betrifft.

Grundsätzlich werden alle, von der Hinderniserkennung kontinuierlich an den Bordrechner gesendeten Objekte, zyklisch verarbeitet. Im Fall der Zugabfahrt werden diese zunächst anhand ihrer Beweglichkeit differenziert. Statische Objekte (siehe Box 1), die sich nicht im Lichtraum befinden, stellen kein Problem dar und haben somit keine Auswirkungen auf das Zugverhalten. Hingegen müssen statische Objekte im Lichtraum beachtet werden, indem ein akustisches Warnsignal abgegeben wird und sich der Zug langsam und innerhalb des Bremsweges dem Objekt annähert.

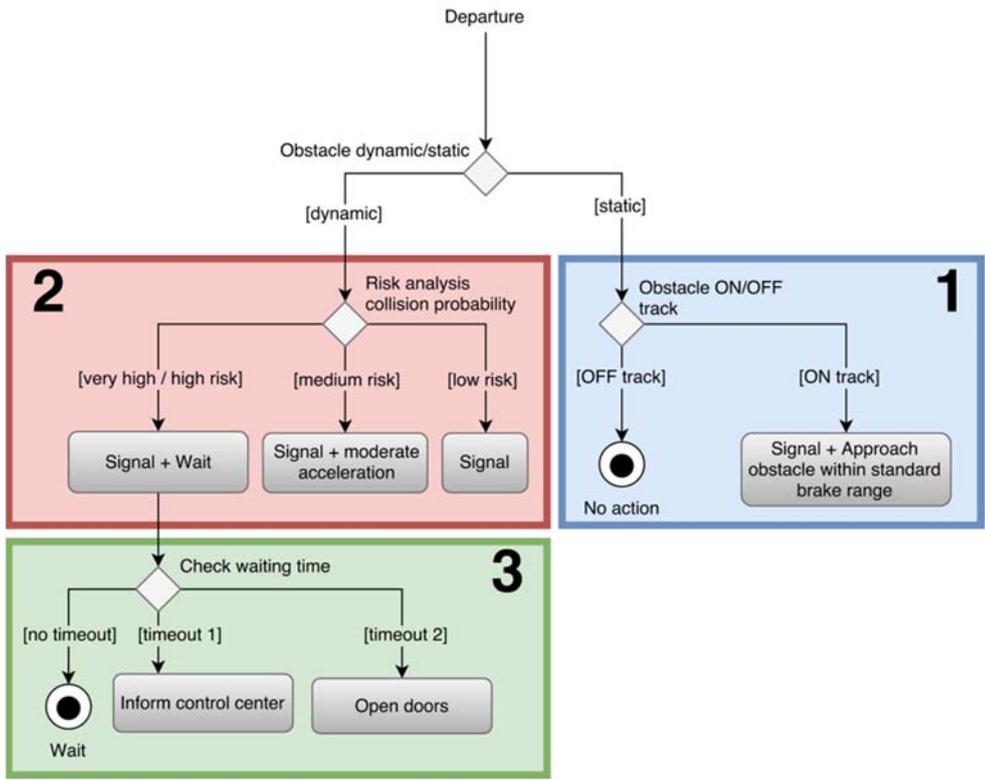


Abbildung 10: Beispielhafter Ausschnitt aus dem Reaktionsmodell für die Fahrzeugsteuerung.

Dynamische Objekte werden anhand von vier Risikoklassen (low, medium, high, very high risk) bzgl. Kollisionswahrscheinlichkeit unterschieden (Box 2). Während bei geringem Risiko lediglich das Signalhorn betätigt wird, erfolgt im Fall der mittleren Kollisionswahrscheinlichkeit zusätzlich eine Anpassung der Anfahrtsbeschleunigung. Bei Objekten mit höherem Risiko darf nicht losgefahren werden. Hierbei wird nach einer definierten Wartezeit (Box 3) die Zentrale über den Umstand informiert. Außerdem können durch einen dortigen Mitarbeiter, oder aber auch automatisiert, die Türen geöffnet werden.

3.3 Felddemonstrator und Laborsimulator

Erarbeitung eines sicheren und mit den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen vereinbaren IT-System-Konzepts für die unbemannten fahrerlosen Züge: Zur zentralen Überwachung des autoBAHN Systems durch eine einzige Person muss eine geeignete prototypische Benutzeroberfläche entworfen und

entwickelt werden. Ferner muss diese graphische Oberfläche an ein unterlagertes Zugsicherungssystem angebunden sein, welches für die Erzeugung sowie Erteilung von konfliktfreien Fahraufträgen, Überwachung der Zugfahrten hinsichtlich statischer und dynamischer Restriktionen und einer vereinfachten Fahrstraßenüberwachung sorgt. In weiterer Folge muss auch das fahrzeugseitige Softwaresystem zur automatisierten Steuerung des Zuges entworfen und schrittweise erarbeitet werden. Die Herausforderung in diesem Teil stellen die Erarbeitung einer zuverlässigen und genauen Zugeigenortung, automatisierte Fahrt sowie Ansteuerung und Überwachung relevanter Systemkomponenten dar. Zur Kommunikation in dem verteilten System, Zentrale sowie die einzelnen Züge, sollen unterschiedliche drahtlose Kommunikationssysteme und deren Architektur auf ihre Eignung im autoBAHN Kontext untersucht werden. Unter anderem ist angedacht den neuen Kommunikationsstandard IEEE 802.15.4p im Rahmen des autoBAHN2020 Systems zu evaluieren.

Es bedarf einer Simulationsumgebung, sodass die wesentlichen Komponenten einzeln und gegebenenfalls auch vernetzt unter Laborbedingungen getestet werden können.

3.3.1 Felddemonstrator

Die Schwerpunkte bei der Softwareentwicklung für einen autonom fahrenden Demonstrator-Zug, waren jene Module, die für einen autonomen Fahrbetrieb besonders relevant sind und nicht durch am Markt verfügbare Standardmodule abgedeckt werden können. Das waren insbesondere die gesamte Hinderniserkennung, das Sicherstellen einer zuverlässigen Lokalisierung, die Entwicklung eines Reaktionsmodells für die Steuerung des Zugverhaltens und die Umsetzung in entsprechende Fahrbefehle abhängig von Hindernissen und den erhaltenen Fahrbefehlen, sowie das Anlegen einer Visualisierung, welche den Fahrdienstleitern relevante Informationen liefert.

Das Lokalisierungsmodul basiert auf einem Extended Kalman Filter. Die Daten für die Sensorfusion liefern folgende Sensoren, welche sich an Bord des Fahrzeuges befinden:

- Satellitennavigationssystem (GNSS)
- Odometer (Inkrementalgeber auf einer Achse des Zuges)
- RFID-Transponder-Lesegerät („Balisenleser“)
- IMU bestehend aus Beschleunigungssensor und Gyroskop

Zusätzlich wurden auch noch Informationen aus dem Streckenatlas aus dem Bahnbetrieb herangezogen.

Dieses Modul konnte eine Positionsbestimmung mit einer Standardabweichung von 1,17 m bei 2σ Standardabweichung (bzw. 1,7 m bei 3σ) (Stadlmann B., 2017) erreichen, und lieferte damit deutlich bessere Ergebnisse, als die einfache Ortung mittels Satelliten.

Das entwickelte Reaktionsmodell (siehe Abschnitt 3.2.5) wurde auf einem Bordrechner implementiert und zyklisch getestet, evaluiert und verbessert. Hierdurch konnten die Szenarien und Parameter schrittweise optimiert werden. Dadurch konnte gezeigt werden, dass das vorliegende Modell den gestellten Anforderungen entsprach, und sich grundsätzlich für den autonomen Betrieb eignet.

Die autonom gesteuerten Testfahrten wurden auf der Strecke Gmunden – Vorchdorf der Fa. Stern & Hafferl mit diesem Demonstrator-Framework durchgeführt.

Die im Zuge des Projektes durchgeführte Evaluierung des Kommunikationsstandards IEEE 802.15.4p hat ergeben, dass der Standard zwar für ein System wie autoBAHN2020 grundsätzlich geeignet ist, eine Anwendung in Europa aber aus praktischen Gründen nicht empfehlenswert ist.

3.3.2 Laborsimulator

Auf Basis der Ergebnisse aus dem Vorprojekt, wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, mit dem Fokus, die Sensorsignale aus der Echtumgebung möglichst realitätsnah nachzubilden.

Diese virtuelle Umgebung ermöglicht nicht nur das zeit- und kostensparende Testen der Algorithmik, sondern auch die Simulation von Szenarien, welche aufgrund von Sicherheitsbeschränkungen nicht real überprüft werden können (Kollision, Entgleisung, und Ähnliches).

Weiter können durch die integrierte Selbstüberwachung auch autonom erstellte Testszenarien simuliert werden, wodurch eine automatische Evaluierung der Software ermöglicht wird. Die Grundstruktur dieser Simulationsumgebung ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

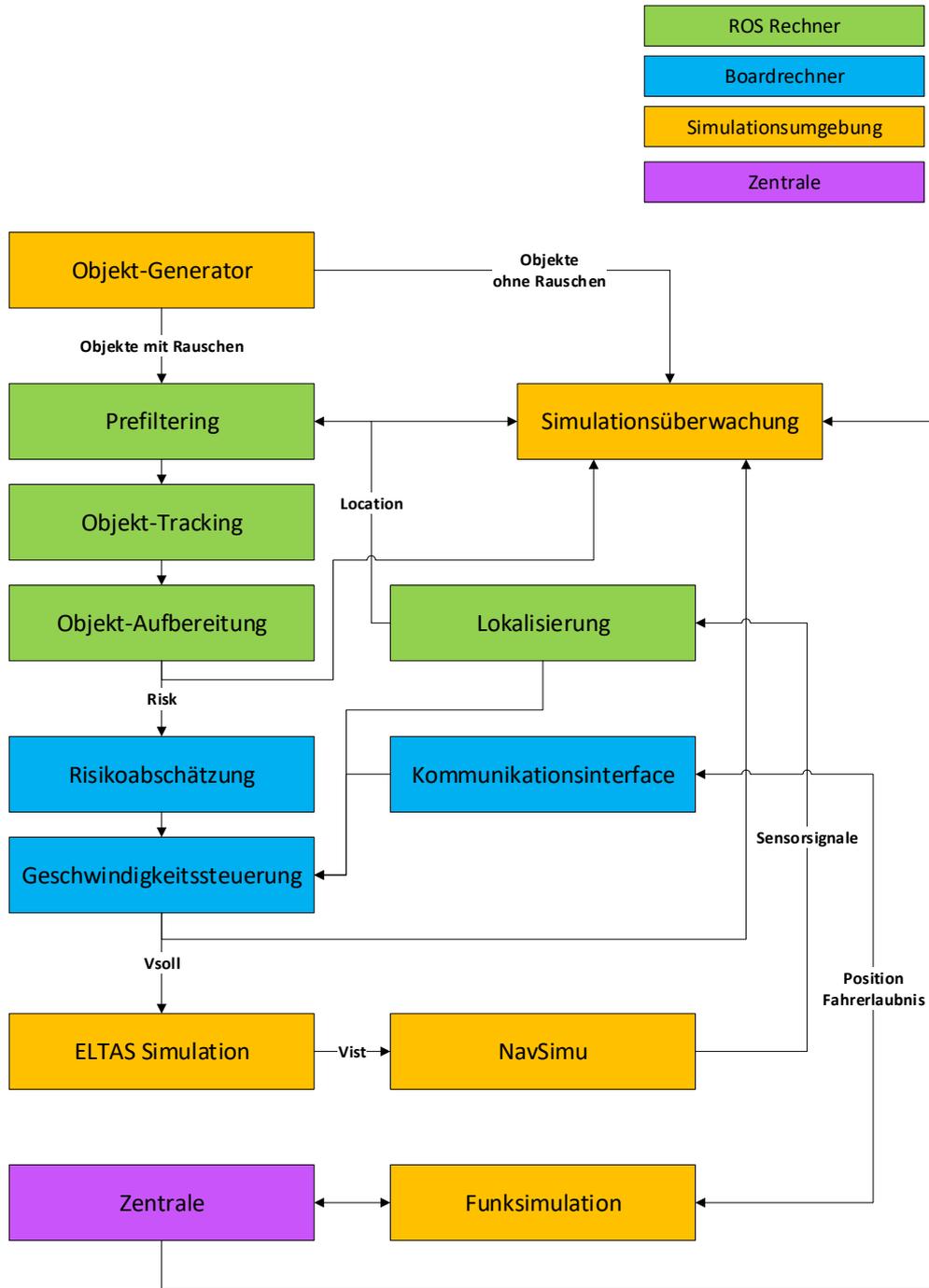


Abbildung 11: Systemarchitektur für Simulation und Testszenarien

3.4 Begleitforschung

3.4.1 Ziele der Begleitforschung

Das Ziel ist eine erweiterte **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**, um die langfristige Rentabilität eines autoBAHN Systems abzuschätzen und allfällige Rahmenbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz identifizieren zu können, sowie die Erarbeitung einer **Akzeptanzstudie**. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden dazu der erwartete Transportbedarf, die erwarteten Verkehrs- und Fahrleistungen einer autonom fahrenden Bahn sowie auf deren Basis die daraus abzuleitenden Investitions- und laufenden Kosten für Energie, Wartung, Instandhaltung, Personal, Infrastrukturanpassungen und Vermarktung erhoben und bewertet.

Die Akzeptanzstudie soll neben dem Nutzerverhalten von Bahnfahrern (Häufigkeit, Gründe, Voraussetzungen für die Nutzung der Bahn etc.), die Assoziationen, Gefühle, Voraussetzungen und Konsequenzen bei fahrerlosen Regionalzügen nach Nutzergruppen differenziert erheben. Erhoben werden sollen auch die Bedeutung von Begleitpersonen im Zug sowie die Unterstützungs- und Serviceleistungen entlang einer Bahnreise. Insgesamt sollen alle wesentlichen Faktoren, die für den Einsatz von fahrerlosen Regionalzügen relevant sind, betrachtet werden, um die weitere Kommunikation oder begleitende Maßnahmen vorzubereiten.

3.4.2 Simulation und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Die Wirtschaftlichkeit eines Bahnbetriebs ist mit der eines Industrie-, Handels- oder anderen Dienstleistungsunternehmens kaum vergleichbar. Ein erheblicher Anteil der Erlöse basiert auf gesetzlichen oder öffentlich-rechtlichen Regelwerken und auch regionalpolitischen Interessen von Ländern und Gemeinden. Aufgrund des staatlichen Interesses am Erhalt und der Entwicklung der notwendigen Infrastruktur leisten öffentliche Stellen maßgebliche Beiträge.

Bei der ÖBB stammen rund 40% der Umsatzerlöse aus öffentlichen Quellen. Ähnliche Zahlen sind auch aus anderen Bahnbereichen bekannt. Im Personenverkehr deutscher Nebenbahnen liegt die Kostendeckung durch direkte Absatzleistungen nur zwischen 20 und 50% der Gesamtkosten.

Mit dem autoBAHN-Konzept sollten folgende Ziele erreicht werden:

- Attraktivitätssteigerung für Passagiere durch verdichteten Verkehr

- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch Erlössteigerung aus der Erhöhung der Passagierzahlen und Verringerung der Personalkosten.
- Verwendung vorhandener Bahn-Infrastruktur bei möglichst geringem Adaptionsbedarf.

Simulation des autoBAHN – Modells

Da Nebenbahnen in der Regel einspurig geführt werden, kann bei der Umstellung auf eine autoBAHN die Errichtung zusätzlicher Ausweichstellen erforderlich sein, da durch die Verdichtung des Verkehrs und die erwartete Erhöhung des Passagieraufkommens Engpässe entstehen. Es stellte sich die Frage, ob das autoBAHN-Systemkonzept die Anforderungen des Verkehrs auf Nebenbahnen erfüllen kann.

Anhand einer diskreten Ereignissimulation wurden folgende leistungsbestimmende Parameter geprüft und für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit herangezogen:

- Anzahl erforderlicher Ausweichstellen
- notwendige Fahrzeugkapazität
- Fahrleistung und Fahrgeschwindigkeit
- Anzahl im Umlauf befindlicher Fahrzeuge
- Zugfolgezeit

Vergleich mit einem bestehenden Betriebskonzept

Der im Jahr 2017/18 gültige Fahrplan einer exemplarisch untersuchten österreichischen Nebenbahn, der mit der Halbierung der Taktzeit ab 2014 bereits eine deutliche Verdichtung erfahren hat, bietet eine über den Tag gemittelte, durchschnittliche Taktzeit von 34 min.

- Durch die derzeit fahrplanmäßig erreichte Fahrzeit von 21 min für die gesamte Strecke bieten die verfügbaren Ausweichstellen ausreichende Flexibilität, um Fahrtakte von 1 h (Fahrplan bis 2014), 30 min (aktuell), 21 min und 10 min anzubieten.
- Auch bei der kürzest möglichen Taktzeit von rund 10 min sind lediglich 4 Fahrzeuge gleichzeitig im Betrieb. Derzeit stehen dem Streckenbetrieb 8 Fahrzeuge zur Verfügung. Die weitere Verkürzung der Taktzeit wird damit nicht durch allenfalls notwendige Investitionen, sondern die erwarteten erhöhten Personalkosten verhindert.

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer autonom fahrenden Bahn wurde zur weiteren Angebotsverbesserung ein 20 min-Takt gewählt. Die vom Bahnbetreiber verfügbaren Kalkulationsansätze wurden entsprechend den Ergebnissen der Simulation adaptiert.

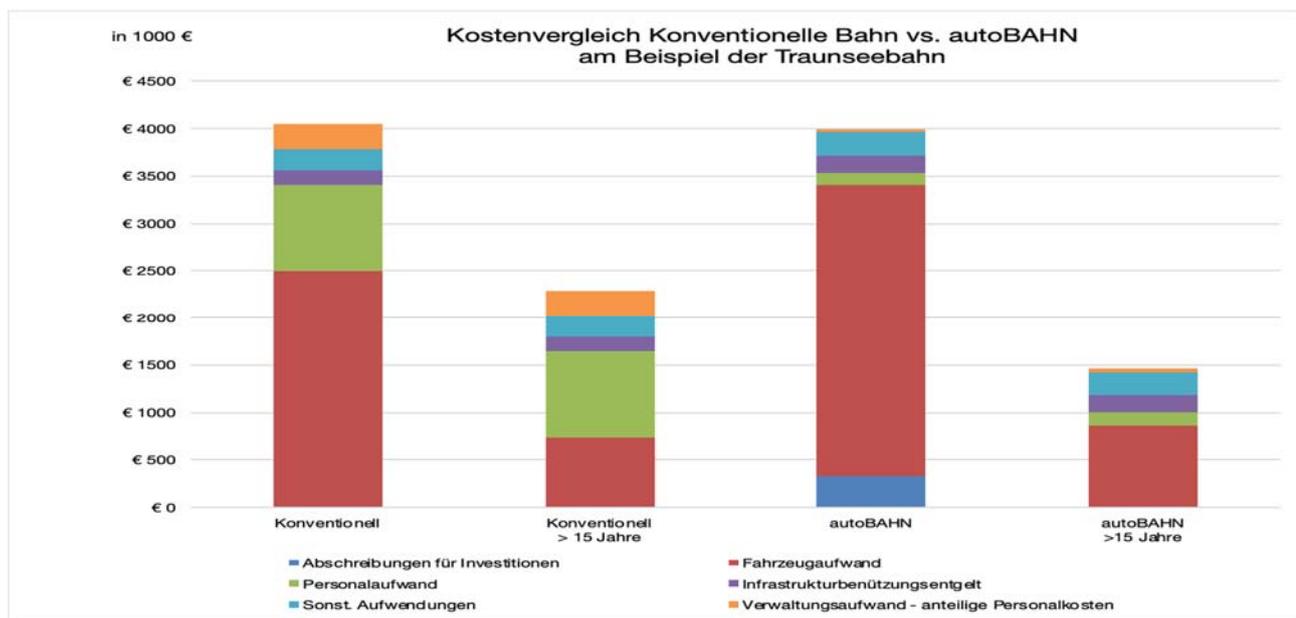


Abbildung 12: Kostenstruktur

Es zeigte sich, dass sich die Kostenstruktur in wichtigen Positionen deutlich verändert. Zusammenhänge finden sich mit kleineren Fahrzeuggrößen, dem damit verbundenen geringeren Gewicht, dem Instandhaltungsaufwand, dem Aufwand für die elektrische Traktionsenergie, dem Personalaufwand für Triebfahrzeugführer und die Zug- bzw. Ticketkontrolle, dem Aufwand für das Infrastrukturbenützungsentgelt in Abhängigkeit von Fahrzeuggewicht und Fahrleistung, der Fahrzeugversicherung und einem reduzierten Verwaltungsaufwand.

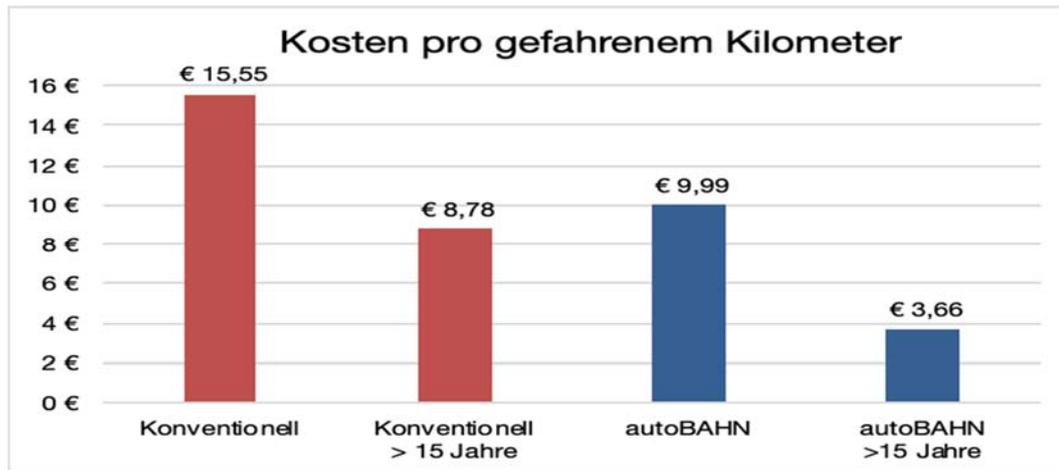


Abbildung 13: Betriebsnutzung

Da die tatsächliche Betriebsnutzung der Fahrzeuge weit über den üblichen Ansatz von 15 Jahren für das Fahrzeugleasing hinausgeht, entsteht in der Kalkulation eine markante Differenz ab Auslaufen des Leasing. Ebenso verhält es sich mit der Abschreibung der Infrastruktur-Investitionen, sodass eine Unterscheidung der Kosten pro Kilometer für die Perioden vor bzw. nach 15 Jahren gemacht wurde.

Im Ergebnis zeigt sich für die Abschreibungsphase nahezu ein Gleichstand des Aufwands für beide Systeme im Ausmaß von rund 4 Mio. EUR, jedoch eine markante Aufwandsreduktion nach Ablauf der Abschreibung für Investitionen von rund $\frac{1}{3}$ zu Gunsten des autoBAHN-Systems. Dieser Effekt verstärkt sich bei Betrachtung des Aufwands pro gefahrenem km aufgrund der um 60 % höheren Fahrleistung der autoBAHN, sodass dieser während der Abschreibungsdauer um rund $\frac{1}{3}$ (15,55 vs. 9,99 EUR/km), danach sogar um rund 60 % geringer als im klassischen System ist (8,78 vs. 3,66 EUR/km).

Kostendeckung aus Ticketerlösen

Auch diese Kennzahl ist im autoBAHN-System deutlich verbessert, indem aufgrund zahlreicher Beispiele aus dem Bahnbetrieb durch die um $\frac{1}{3}$ - $\frac{2}{3}$ (von 30 auf 20 bzw. 10 min) verkürzte Taktzeit mit einer weiteren Zunahme des Passagieraufkommens gerechnet werden kann. Die erwartete Steigerung der Passagierzahlen wurde mit +60 % geschätzt, wobei einige Beispiele mit Ergebnissen von +100 bis +400 % aus dem Pinzgau und Deutschland (Regiobahn Düsseldorf-Wuppertal) aufgrund von Taktverkürzungen vorliegen. Die Erwartung dieser Steigerung wird auch von der Geschäftsführung des kooperierenden Bahnbetreibers unterstützt.

Im Ergebnis verbessert sich die Kostendeckung aus Ticketerlösen nach Ablauf der 15jährigen Abschreibungsdauer von 17,5 % auf 27,4 %. Davor ist sie mit 9,9 % vs. 10,0 % in beiden Systemen praktisch identisch.

3.4.3 Akzeptanzstudie

Autonom- bzw. selbststeuernde Fahrzeuge werden zukünftig sehr wahrscheinlich einen fixen Bestandteil der täglichen Mobilität darstellen. Während das autonome Fahren bei PKWs breit medial diskutiert wird, finden autonom fahrende Züge in der Öffentlichkeit kaum Beachtung, obwohl der automatisierte Verkehr in einigen Bereichen, wie z.B. in U-Bahn-Systemen, bereits umgesetzt ist. Da in Österreich rund die Hälfte der Einwohner in den Regionen außerhalb großer Städte lebt, sollte neben dem städtischen auch dem regionalen Verkehr ein hoher Stellenwert eingeräumt werden. Regionalbahnstrecken dienen in den ländlichen Gegenden der lokalen Erschließung und sind für die Regionen ein wichtiges Mobilitätsangebot. Um den Transport von Personen mit Schienenfahrzeugen auf Nebenstrecken attraktiver und energieeffizienter zu gestalten, fokussierte das Forschungsprojekt „autoBAHN2020“ auf die Entwicklung autonom fahrender Regionalbahnen. Das Ziel liegt dabei in der Erhöhung der Taktfrequenz – ähnlich wie bei S- und U-Bahnen –, um das Fahrgastaufkommen zu steigern und damit die Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Eine besondere technologische Herausforderung stellt die Entwicklung einer zuverlässig funktionierenden Hindernis- und Gefahrenerkennung dar, welche auf frei zugänglichen Strecken ohne Absperrung der Gleise erforderlich ist. Neben den technologischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen ist jedoch auch die Akzeptanz durch die Fahrgäste autonom fahrender Regionalbahnen für den gewünschten Erfolg unerlässlich. Daher wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „autoBAHN2020“ die vorliegende Akzeptanzstudie durchgeführt, um die Bereitschaft der Fahrgäste zur Nutzung selbstfahrender Züge in Erfahrung zu bringen und Handlungsempfehlungen sowie Maßnahmen zur Akzeptanzsteigerung abzuleiten.

Zunächst diente eine umfassende Literatur- und Studienrecherche der Exploration des Forschungsfeldes. In weiterer Folge konnten durch Experteninterviews die notwendigen Grundlagen und Informationen zur Konzipierung der Fahrgastbefragung gewonnen werden. Die quantitative Befragung von rund 1500 Fahrgästen mittels Fragebogen fand in vier ausgewählten Regionalbahnen zu unterschiedlichen Zeiten im Tages- und Wochenverlauf statt. Das Ziel der Erhebung war, neben dem Nutzerverhalten und den Bedürfnissen der Reisenden auch Assoziationen, Gefühle, gewünschte Voraussetzungen sowie Vor- und Nachteile selbstfahrender Regionalzüge in Erfahrung zu bringen.

Die Ergebnisse der Erhebungen zeigen, dass überwiegend junge und sich in Ausbildung befindende Personen unter 25 Jahren die Regionalbahn nutzen. Knapp drei Viertel der befragten Fahrgäste zählen zudem zu den Vielfahrern und schätzen sich als kompetent im Umgang mit öffentlichen Verkehrsmittel ein.

Als Hauptmotiv für die Nutzung wird die passende Verbindung angegeben und mehr als die Hälfte benutzt mindestens ein zusätzliches öffentliches Verkehrsmittel zur Reise. Dies spiegelt sich in den genannten Vorteilen selbstfahrender Regionalbahnen wider, welche vermehrt in einer höheren Taktfrequenz und pünktlicheren Zügen gesehen werden. Aber auch die Anbindung der Bahnhöfe und Haltestellen nimmt einen wichtigen Stellenwert ein, da diese zu Fuß, per Fahrrad oder PKW einfach und komfortabel erreicht werden sollten. Es ist daher entscheidend, dass zum einen die Anbindungen sowie ausreichende Fahrradabstell- und Parkplätze bereits in der Raumplanung berücksichtigt werden. Zum anderen ist die Anpassung der Fahrpläne öffentlicher Verkehrsmittel sowie die tarifliche Abstimmung ein wichtiger Schritt um die Attraktivität der Regionalbahn zu steigern.

Der derzeitige Reiseprozess wird hinsichtlich des Fahrkartenerwerbs und der Verfügbarkeit von Informationen vor und während der Bahnfahrt überwiegend positiv bewertet. Obwohl sich jeder 10. Fahrgast in seiner Mobilität – vorrangig durch Gepäck und mitgeführte Fahrräder – eingeschränkt fühlte, hatte davon nur ein kleiner Anteil tatsächlichen Unterstützungsbedarf, welcher zum Großteil erfüllt wurde. Hier gilt es zum einen weiterhin ausreichende Informationen bereit zu stellen und zum anderen die Barrierefreiheit bei der Benutzung öffentlicher Verkehrsmittel zu forcieren und auszubauen. Da selbstfahrende Züge möglicherweise zukünftig auch ohne Personal verkehren könnten, muss darauf ein wichtiges Augenmerk gelegt werden, damit die Fahrgäste problemlos auch ohne zusätzliche Unterstützung durch Begleitpersonal selbstfahrende Regionalbahnen nutzen können.

Die Fahrgastbefragung verdeutlicht auch, dass die Sicherheit einen zentralen Stellenwert in der Diskussion über autonom fahrende Regionalbahnen einnimmt. Für knapp 70 % wird die Sicherheit beim Bahnfahren generell als sehr wichtig erachtet und sogar etwas mehr fühlen sich während des aktuellen Betriebes auch tatsächlich sehr sicher. Hinsichtlich des Zukunftsszenarios der autonom fahrenden Regionalbahnen würde sich jedoch insgesamt etwas mehr als die Hälfte der Befragten vergleichsweise unsicherer fühlen. Knapp die Hälfte prognostiziert zudem ein höheres Unfallrisiko bei selbstfahrenden Zügen im Vergleich zum derzeitigen Bahnbetrieb. Dennoch können sich zwei Drittel aller befragten Fahrgäste vorstellen, einen selbstfahrenden Zug ohne Lokführer zu nutzen. Unter bestimmten Voraussetzungen, wie einer ausgereiften Technik, einer externen Überwachung sowie einer Sprechverbindung in Notfällen wäre es sogar für rund 87 % vorstellbar. Als Ablehnungsgründe werden hier wiederum vor allem die Unsicherheit, das fehlende Vertrauen in die Technik sowie die Abwesenheit

von Personal im Zug angeführt. Zum Abbau dieser bestehenden Unsicherheiten trägt zum einen die Aufklärung der Bevölkerung über technische Hintergründe und Details selbstfahrender Züge bei. Zum anderen kann durch die Kommunikation positiver Erfahrungswerte aus anderen Ländern sowie die Erkenntnisse anderer Bereiche, wie z.B. den selbstfahrenden U-Bahnen, das Sicherheitsgefühl gesteigert werden. Es ist zudem entscheidend, dass autonom fahrende Regionalbahnen von Beginn an ohne Probleme und Zwischenfälle verkehren, um das Vertrauen der Fahrgäste zu gewinnen.

Die Nachteile von selbstfahrenden Zügen sehen die befragten Fahrgäste jedoch nicht vorrangig in einer Steigerung der Stör- und Unfälle, sondern in einer zunehmenden Verschmutzung, mehr Vandalismus und einer fehlenden Unterstützungsmöglichkeit bei Bedarf. Als Ablehnungsgrund autonom fahrender Züge wird außerdem häufig der fehlende menschliche Faktor genannt, was wiederum Unsicherheit auslöst.

Insgesamt gab die Hälfte der Befragten in der Erhebung an, aktuell einen Zugbegleiter zu benötigen, ihn aber auch zukünftig für die Nutzung einer selbstfahrenden Bahn vorauszusetzen. Ebenso beschreiben die Experten in den Interviews die Notwendigkeit von Personal in autonom fahrenden Zügen, welches zumindest zu Beginn der Umstellung die Fahrten begleiten sollte, um die Akzeptanz der Fahrgäste zu steigern.

Die Erhebungen zeigen ebenso die unterschiedlichen Einstellungen, Bedürfnisse und Anforderungen unterschiedlicher Nutzergruppen auf. Während tendenziell eher Männer, jüngere Personen und Vielfahrer zu den Befürwortern von selbstfahrenden Regionalbahnen zählen, empfinden Frauen und ältere Personen sowie gelegentlich Fahrende ein höheres Ausmaß an Unsicherheit. Für die Akzeptanz ist es daher entscheidend, zielgruppengerechte Angebote zu schaffen und diese auch zu kommunizieren.

Da das vorrangige Ziel der Einführung selbstfahrender Regionalbahnen in der Steigerung des Fahrgastaufkommens zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit liegt, ist die Gewinnung neuer Fahrgäste von zentraler Bedeutung. Das Bahnfahren muss daher auch für derzeitige Nichtfahrer an Attraktivität zunehmen. Potentielle Fahrgäste konnten im Rahmen dieses Projektes nicht berücksichtigt werden. Eine zukünftige Befragung dieser Zielgruppe ist jedoch von großem Interesse, um die derzeitigen Ablehnungsgründe sowie deren Wünsche und Bedürfnisse in Erfahrung zu bringen und entsprechende Angebote zu entwickeln.

Sollten zukünftig autonom fahrende Regionalbahnen bereits im Einsatz sein, braucht es zudem eine kontinuierliche Evaluierung des bestehenden Betriebs und dementsprechende Anpassungen bzw. Maßnahmen zur Optimierung. Zur Förderung des Einsatzes und der erfolgreichen Umsetzung sind jedoch nicht nur die Bahnbetreiber, sondern auch die Betreiber anderer öffentlicher Verkehrsmittel,

sowie Politik und Verwaltung in Ländern, Städten und Gemeinden. Denn nur ein Zusammenspiel zahlreicher Maßnahmen verschiedener Stakeholder kann letztlich den gewünschten Erfolg bringen und die Akzeptanz autonom fahrender Regionalbahnen in der Bevölkerung steigern.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes autoBAHN2020 konnten wesentliche Fortschritte für einen zukünftigen Betrieb von autonomen Regionalzügen erzielt werden. Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt wurden in folgenden Bereichen erreicht: Hinderniserkennung inkl. Objektfusion, Reaktionsmodell für die Fahrstrategie, Risikoanalyse, Sicherheitsanalyse inkl. Prozessdefinition und Klärung für einen Zulassungspfad.

Das Projekt autoBAHN2020 hat eine solide Basis gelegt, ein solches System zur Produktreife zu entwickeln. Im Rahmen der nächsten Entwicklungsschritte muss die Hinderniserkennung noch in zahlreichen realen Testfahrten evaluiert werden, um die bisherigen Ergebnisse abzusichern und im Detailbereich weiter zu verfeinern. Im Rahmen der Produktentwicklung müssen auch die für eine spätere Zulassung benötigten Dokumente erarbeitet werden.

5 Literaturverzeichnis

- Abed, S. K. (2010). European rail traffic management system-an overview. *2010 1st International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ)*, (S. 173-180).
- Briginshaw, D. (2004). FIRST METRO TO CONVERT TO FULL AUTOMATION. *INTERNATIONAL RAILWAY JOURNAL AND RAPID TRANSIT REVIEW*, 44.
- CE, D. O. (1997). Innovative Güterwagen. *Der Eisenbahningenieur*, 48, 7-13.
- Frederich, F. (1994). Chaos als Konzept Schienengütertransport mit selbstorganisierenden Fahrzeugen. *ZEV, DET, Glasers Annalen, Die Eisenbahntechnik*, 118, 329-338.
- Frederich, F., & B, L. E. (1997). Automatisches Fahren: Beispiele aus dem Güterverkehr: SST, selbsttätig signalgeführtes Triebfahrzeug und SOG, selbstorganisierender Güterverkehr. *ZEV, DET, Glasers Annalen, Die Eisenbahntechnik*, 121, 571-578.
- Frederich, F., & Lege, B. (1996). SST und SOG, Neuerungen für den Schienen-Güterverkehr. *ETR. Eisenbahntechnische Rundschau*, 45, 611-616.
- Friman, B. (2010). An algorithm for braking curve calculations in ERTMS train protection systems. *Advanced Train Control Systems*, 65.
- Gebauer, O., Pree, W., & Stadlmann, B. (2012). Autonomously driving trains on open tracks concepts, system architecture and implementation aspects. *it-Information Technology Methoden und innovative Anwendungen der Informatik und Informationstechnik*, 54, 266-279.
- Henke, C., Rustemeier, C., Schneider, T., Böcker, J., & Trächtler, A. (2007). Railcab--ein schienenverkehrssystem mit autonomen, linearmotor getriebenen einzelfahrzeugen. *Int. ETG-Kongress--Kundennutzen durch neue Technologien in der Bahntechnik*.
- Mairhofer, F. (2004). CARGOMOVER: AN INNOVATIVE MODE OF AUTOMATED FREIGHT TRANSPORT. *Rail Engineering International*, 33.
- Montremerlo, M., Beeker, J., Bhat, S., & Dahlkamp, H. (2008). The stanford entry in the urban challenge. *Journal of Field Robotics*, 7, 468-492.
- Reibeling, C. A. (2009). Positive train control for Australia. *IEEE vehicular technology magazine*, 4, 35-44.
- Stadlmann B., P. T. (2018). Autonomous driving on freely accessible railway tracks. *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018, Vienna, Austria*. Vienna, Austria.
- Stadlmann B.; M. S. (2017). GNSS based train control for automatic train operation. *Proceedings of the IEE-ITST Conference*. Warsaw, Poland.

- Vuk, G. (2005). Transport impacts of the Copenhagen Metro. *Journal of Transport Geography*, 13, 223-233.
- Weichselbaum, J., Zinner, C., Gebauer, O., & Pree, W. (2013). Accurate 3D-vision-based obstacle detection for an autonomous train. *Computers in Industry*, 64, 1209-1220.
- Zinner, C., Humenberger, M., Ambrosch, K., & Kubinger, W. (2008). An optimized software-based implementation of a census-based stereo matching algorithm. *International Symposium on Visual Computing*, (S. 216-227).

6 Anhang

6.1 Tabellenverzeichnis:

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Liste an Verordnungen | 19 |
|--|----|

6.2 Abbildungsverzeichnis:

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Fehlverhalten der Verlaufsschätzung bei Ungenauigkeiten der Navigation. | 8 |
| Abbildung 2: Testfahrzeug mit Hauptframe, an welchem die Sensoren befestigt sind..... | 9 |
| Abbildung 3: LiDAR Objekterkennung | 10 |
| Abbildung 4: Bildgebende Sensorik und herausfordernde Umgebungsbedingungen. Oben links: Forschungsaufbau für ein Multikamerasystem; Oben rechts: bei Nacht; Unten links: Aufnahme im thermischen Infrarot; Unten rechts: Testsituation bei starkem Schneefall..... | 11 |
| Abbildung 5: Visualisierung der Stereokamera-basierten Hinderniserkennung (rechte Spalte) und einer Actionkamera aus dem Fahrerstand (linke Spalte) bei der Annäherung an einen Testdummy. Oben: Kontinuierliche Erkennung bei Annäherung an einen Testdummy. Unten: Erkennung nach dem automatischen Stopp..... | 12 |
| Abbildung 6: Objekthandling von der ersten Detektion bis zur Aufbereitung für das Reaktionsmodell. | 13 |
| Abbildung 7: Bewertungsschema für 3D Sensoren zur Hindernisdetektion auf Schienenfahrzeugen (veröffentlicht in (Stadlmann B., 2018)) | 14 |
| Abbildung 8: Georeferenzierte Objekte in zwei unterschiedlichen Darstellungen. Links: 6D Pose in Weltkoordinaten wird verwendet, um die Objekte in ein aktuelles Kamerabild zu projizieren. Rechts: Luftbild überlagert mit den Objekten. Bei genauerer Betrachtung ist der Versatz zwischen den Objekten und dieser Luftbildquelle erkennbar – die Objekte wurden offensichtlich anhand einer anderen Quelle kartiert..... | 15 |
| Abbildung 9: Prozess: Beobachtung der Strecke im autonomen Fahrbetrieb. | 17 |
| Abbildung 10: Beispielhafter Ausschnitt aus dem Reaktionsmodell für die Fahrzeugsteuerung..... | 27 |
| Abbildung 11: Systemarchitektur für Simulation und Testsznarien | 30 |
| Abbildung 12: Kostenstruktur | 33 |
| Abbildung 13: Betriebsnutzung..... | 34 |

Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

7 Kontaktdaten

FH-Prof. DI Dr. Burkhard Stadlmann

FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH

Stelzhamerstraße 23

4600 Wels Austria

Tel.: +43 5 0804 43420

Fax.: +43 5 0804 943420

Mail: burkhard.stadlmann@fh-wels.at

Projekt Webpage: <https://forschung.fh-ooe.at/bahnautomatisierung-und-verkehrstelematik/projekte/autobahn2020/>

Webpage: <https://www.fh-ooe.at/>

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen Name / Institut oder Unternehmen

AIT – Austrian Institute of Technology

Siemens AG Österreich (bis 6.2018)

Siemens Mobility GmbH (ab 7.2018)

Stern & Hafferl Verkehrsgesellschaft mbH

GeoSpy Aerial Imaging & Mapping e.U.

ZT - Büro Fischer