

Mobilität der Zukunft

autoSHUNTING

Experimentelle Entwicklung für hochautomatisierten Verschub im Eisenbahngüterverkehr

Ein Projekt finanziert im Rahmen der 11. Ausschreibung
des FTI-Programms **Mobilität der Zukunft** durch das BMK
System Bahn / Gütermobilität

Das Projekt autoSHUNTING hatte das Ziel, wesentliche Vorarbeiten zur Umsetzung eines hochautomatisierten Verschubs im Schienengüterverkehr zu erbringen. Dafür wurden im Projekt inhaltlich drei Schwerpunkte gesetzt und folgende Ergebnisse erzielt.

(1) Anforderungs- und Prozessanalyse

Für einen automatisierten Verschub wurden die Anforderungen systematisch erfasst und die davon abgeleiteten Prozesse analysiert. Betrachtet wurden die Fälle (a) Verschubfahrten im Bereich automatisierter Rollberg, (b) Abdrücken in nicht automatisierten Verschubknoten und (c) Fahrverschub sowie Beistellen und Abholen von Wagen.

Eine genaue Analyse erfolgte auch bei den Bremsprozessen, die beim Verschub bedingt durch die sich ständig ändernde Wagenkonfiguration eine große Herausforderung darstellen.

(2) Sensorikbasiertes Automatisches Verschieben (GoA3 bzw. GoA4)

Um das Ziel automatischer Verschubfahrten mit hohem Automatisierungsgrad zu erreichen, wurde eine umfassende Hinderniserkennungssensorik aufgebaut und die dazugehörige Auswertungssoftware entwickelt. Mit Hilfe dieses Systems kann eine vollautomatische Fahrt und ein Ankuppeln an Wagen durchgeführt werden, da stationäre und bewegliche Hindernisse erfasst und außerdem Lichtsignale und Signaltafeln erkannt werden. Zusätzlich wird auch der zu erwartende Fahrweg inkl. Weichenstellungen detektiert.

(3) Simulationen und ergänzende Analysen

In Simulationen wurde gezeigt, dass bei der derzeitigen Betriebssituation in vielen Bereichen auch zukünftig angedachte selbstfahrende Güterwagen für die Last-Mile-Zustellung in den Betriebsablauf integrierbar sind. Auch die Wirtschaftlichkeit derartiger Umstellungen wurde untersucht und nach dem derzeitigen Wissensstand kann davon ausgegangen werden, dass ein automatischer Verschub auch wirtschaftlich vorteilhaft ist.

Kontaktdaten:

FH OÖ (Konsortialführung)

FH-Prof. DI Dr. Burkhard Stadlmann

Burkhard.stadlmann@fh-wels.at



FH St.Pölten

Dipl.Ing. Frank Michelberger

Frank.michelberger@fhstp.ac.at



AIT

Dipl.Ing. Jürgen Zajicek

Juergen.zajicek@ait.at



ÖBB Infrastruktur AG

Mag. Karl Zöchmeister

Karl.zoechmeister@oebb.at



ÖBB Produktion GmbH

Dipl.Ing. Christian Jäger

Christian.jaeger@oebb.at



Rail Cargo Austria AG

Ing. Maximilian Mertl

Maximilian.mertl@railcargo.com



Anhang:

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
1.1. Aufgabenstellung	5
1.2. Einordnung in das Programm	6
2. Inhaltliche Darstellung	6
2.1. Schwerpunkte des Projektes	6
2.2. Arbeitspakete	7
2.2.1. Anforderungsanalyse	7
2.2.2. Prozesse	7
2.2.3. Sensorik	11
2.2.4. Signalerkennung	19
2.2.5. Prozesssteuerung und Systemintegration	21
2.2.6. Feldtests	23
2.2.7. Begleitforschung	24
3. Zusammenfassung und Ausblick	27
4. Literaturverzeichnis	28
5. Anhang	29
5.1. Abbildungsverzeichnis	29

1. Einleitung

Der effiziente Betrieb in einem Verschiebebahnhof und bei der Feinverteilung (Fahrvershub) ist für die zukünftige Entwicklung des Bahngüterverkehrs und dabei insbesondere des Einzelwagen-Ladungsverkehrs (EWV) von entscheidender Bedeutung.

Der Betrieb soll dabei schnell, sicher und möglichst kostengünstig erfolgen. Das Projekt autoSHUNTING zielt daher darauf ab, weitere Automatisierungsschritte der Verschubaktivitäten zu untersuchen, wichtige technische Aspekte umzusetzen und in real möglichen Einsatzumgebungen zu testen.

1.1. Aufgabenstellung

Ziel ist es, Methoden und Verfahren zu demonstrieren, die bei den folgenden Aufgaben einen automatisierten Ablauf ermöglichen:

- (1) Fahrt von der Einfahrgruppe zum Rollberg,
- (2) Rückfahrt vom Rollberg zum nächsten abzudrückenden Zug sowie
- (3) Automatisiertes Abdrücken in nicht automatisierten Verschubbahnhöfen bzw. Infrastrukturknoten.
- (4) Weiters soll im Fahrverschub bzw. bei der Abholung und Beistellung auf Nebenbahnen/Nebengleisen/Anschlussbahnen durch automatisierte Teilprozesse der Sicherheitslevel für das eingesetzte Personal drastisch gesteigert und der Zeitaufwand verringert werden.

Grundlage bildet ein modulares Grundkonzept für das automatisierte Bilden und Auflösen von Wagengruppen sowie deren Beistellung und Abholung. Ziel ist ein projektbezogener Probetrieb in real möglichen Einsatzumgebungen. Für die Feldtests ist die prototypische Ausstattung einer Verschublok mit entsprechender Sensorik vorgesehen. Die ursprünglich auch geplante Aktorik in der Lok konnte wegen der Einschränkungen durch die Covid-Pandemie nicht umgesetzt werden.

Neben den Fragen der technischen Realisierung unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen (z.B. Einhaltung der Bestimmungen des ArbeitnehmerInnenschutzes) ist die Frage der Wirtschaftlichkeit von großer Bedeutung. Gerade auch das Zusammenspiel von notwendigen Automatisierungsschritten im beschriebenen Gesamtprozess und deren wirtschaftliche Realisierungsmöglichkeiten sollen in einem Arbeitspaket zur Begleitforschung betrachtet werden. Dabei sollen auch die mögliche Einbindung und Auswirkungen von automatisierten Kupplungsprozessen, selbstfahrenden Güterwagen sowie automatisierter Bremsproben berücksichtigt werden. Die vorgelagerten Prozesse der Verschubplanung, der Verschub-Einsatzplanung bis hin zu den konkreten Verschubaufträgen im Zusammenspiel zwischen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) und Infrastruktur-Betrieb sollen die Grundlage für die umfassende und durchgehende Automatisierung in Richtung Supply Chain Integration bilden.

Mobilität der Zukunft

1.2. Einordnung in das Programm

Der Prozess der Zerlegung und Neuzusammenstellung von Güterzügen im Verschiebebahnhof ist ein ganz entscheidender Prozess für den Wagenladungsverkehr. Unter dem Begriff „Einzelwagen-Ladungsverkehr“ (EWW) versteht man die Organisation des Güterverkehrs auf der Schiene, bei dem Züge aus Einzelwagen oder Wagengruppen zusammengesetzt sind, die unterschiedliche Absende- oder Empfangsstationen haben. Diese Züge werden in Verschiebebahnhöfen zusammengestellt und über einen Teil der Strecke gemeinsam als Zug transportiert. Im Unterschied dazu gibt es Ganzzüge, bei denen der Zug während des gesamten Transportweges nicht getrennt wird (beispielsweise Züge mit Eisenerz vom Hafen zum Stahlwerk).

Der Einzelwagenverkehr ist durch die starke Konkurrenz des Verkehrsträgers Straße unter sehr starkem Konkurrenzdruck in Bezug auf Kosten, Schnelligkeit und Flexibilität. Eine starke Optimierung der Abläufe im Sinne einer Automatisierung und ein Einbetten hochautomatisiert ablaufender Prozesse in ein Gesamtkonzept „Verschub 4.0“ sind daher entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit des EWW. Das Projekt autoSHUNTING zielt dabei auf die Automatisierung wesentlicher Teilprozesse des Verschubs zur Effizienzsteigerung und Kostenreduktion durch Prozessbeschleunigung und Sicherheitssteigerung ab.

2. Inhaltliche Darstellung

2.1. Schwerpunkte des Projektes

Die Schwerpunkte des Projektes autoSHUNTING adressieren einen wesentlichen Teil des Ausschreibungsschwerpunktes 2.1.1. Automatisierte Zugbildung und –trennung, namentlich die „Verschubprozesse wie das Auflösen und Bilden von Wagengruppen bzw. Zügen in Verschiebebahnhöfen oder die Abholung und das Beistellen von Einzelwagen und Wagengruppen ...“

In einzelnen Aspekten werden auch die Ausschreibungsschwerpunkte 2.1.2 (Automatisierter Bahnbetrieb auf Nebenbahnen) und 2.1.3 (Automatisierte Zugsteuerung) angesprochen.

Zum Punkt 2.1.2 trägt autoSHUNTING bei, indem ein automatisiertes Beistellen und Abholen von Güterwagen die Nebenbahnen belebt und diese damit verkehrlich und wirtschaftlich attraktiver werden lässt.

Zum Punkt 2.1.3 trägt autoSHUNTING bei, indem für die Zugsteuerung modernste Verfahren der Zugortung, Sensorikauswertung und Aspekte der künstlichen Intelligenz Verwendung finden.

Die strategischen Programmzielsetzungen werden ebenfalls unterstützt, da mit Hilfe der Ergebnisse von autoSHUNTING der Einzelwagen-Ladungsverkehr effizienter und schneller gemacht werden kann. Dies trägt zu einer Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit des Schienengüterverkehrs bei. Damit werden die Ziele „Reduzierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs“ sowie eine Stärkung von „Nachhaltigen Mobilitätsformen“ unterstützt.

2.2. Arbeitspakete

2.2.1. Anforderungsanalyse

Definition von Einsatzszenarien und Betriebsarten: Auf Basis der verschiedenen Vorarbeiten während der Projektlaufzeit wurde seitens der ÖBB ein umfassendes Dokument mit den Einsatzszenarien am Rollberg erstellt, die jedoch in ihren elementaren Aufgaben auch abseits des Rollberges gültig sind.

Systematische Erhebung der Anforderungen: Seitens der ÖBB-Infra wurden die bereits in der ersten Projektphase definierten Anforderungen weiter detailliert und in einem entsprechenden Dokument zusammengefasst.

Es wurde eine Benutzerschnittstelle für die Mensch-Maschine-Kommunikation als Interface zur Überwachung und Bedienung der Bewegungen am Verschub Bahnhof definiert und als Prototyp implementiert.

2.2.2. Prozesse

Subprozesse für den automatisierten Verschub (ASO – Automatic Shunting Operation):

Es zeigt sich, dass bei den verschiedenen Verschubprozessen, wie beispielsweise dem Beistellen oder Abholen von Wagen wiederkehrende Abläufe durchgeführt werden. Nach einer generischen Darstellung und aufbauend auf den Prozessanalysen wurden in dieser Periode die Auswirkungen der automatisierten Verschubeinheit betrachtet. Es zeigt sich, dass aufgrund zahlreicher Begleittätigkeiten (z.B. Bremsprobe, Sicherung der Wagen, usw.) weiterhin ein/e MitarbeiterIn erforderlich ist. Zum Beispiel sind bis zur flächendeckenden Implementierung einer Digitalen Automatischen Kupplung (DAK) weiterhin

Mobilität der Zukunft

Schraubenkupplungen zwischen den Güterwagen zu öffnen und zu schließen. Die Kupplungsstelle zwischen dem ersten Güterwagen und dem Verschubtriebfahrzeug kann mittels automatischer Rangierkupplung verbunden werden. Im Regelfall ist es also für das verbleibende Personal möglich, die Tätigkeiten unterstützt durch die automatisierte Verschiebeinheit durchzuführen. Mithilfe der Schnittstellen zu anderen Systemen ist es auch möglich, einen genauen Zustand zu erheben und in Abläufe korrigierend einzugreifen. Kommt es zu Systemausfällen sind je nach Art des Ausfalls verschiedene Maßnahmen erforderlich. Fällt beispielsweise die Sensorik während einer Verschubfahrt aus, so ist ein Bremsvorgang bis zum Stillstand das Mittel der Wahl. In der Rückfallebene muss es notwendig sein, dass die Verschiebeinheit auch manuell gesteuert wird. Dies wird durch das verbleibende Personal übernommen. Dies hat jedoch zur Folge, dass sich die Prozessabläufe deutlich verlängern und es zu einer Verzögerung im gesamten Tagesablauf kommt oder eventuell nicht mehr der gesamte Tagesablauf abgearbeitet werden kann. Um dies abzubilden, wurden zwei unterschiedliche Verschubreserven detailliert betrachtet. Dabei wurden die Tagespläne analysiert und auch entsprechend einer Simulation dargestellt. Dazu wurde mittels FBS (Fahrplanbearbeitungssystem) eine Streckeninfrastruktur mit dem Fahrplan des Personen- und Güterverkehrs erstellt und dieser analysiert. Dabei zeigte sich, dass auch auf schwächer befahrenen Nebenbahnen ein Fokus darauf liegen muss, die Bahnstrecke nur so kurz als möglich mit Verschubtätigkeiten zu blockieren. Hier zeigt sich auch die Verbindung zur Prozesssimulation im Abschnitt 2.2.7. Dort wird auf diese Problematik eingegangen und ein selbstfahrender Güterwagen auf einer Nebenbahn simuliert. Betrachtet man, welche Anteile die jeweiligen Teiltätigkeiten haben, dann kann daraus abgeleitet werden, wie sich der Einsatz der MitarbeiterInnen verändert. Dies stellt die Grundlage für weitere Untersuchungen im Rahmen der Begleitforschung dar. An dieser Stelle sei jedoch anzumerken, dass insbesondere der Einsatz der DAK hier als Enabler dient, um weitere Optimierungen vorzunehmen. Geht man davon aus, dass die Untersuchungen der Wagen nach ZSB 31 oder die Bremsprobe durch Sensorik ersetzt werden können, so kann nicht nur das Berufsbild des Verschubpersonals attraktiver werden, sondern auch die Geschwindigkeit der Tätigkeiten, da diese durch das Personal nicht zeitgleich abgewickelt werden können, wie das bei technischen Lösungen der Fall wäre. Dies wurde detaillierter im nachfolgenden Abschnitt über die Einbindung der automatisierten Verschubprozesse in die Supply Chains betrachtet.

Subprozesse Bremsverhalten:

Mobilität der Zukunft

Der Vershub wird beim bestehenden Betrieb auf zwei Arten durchgeführt. Einerseits kann auf Sicht gefahren werden oder es wird mittels einer Vershubstraße signalisiert, dass die Elemente der Vershubstraße in der richtigen Stellung und gesichert sind. Der große Unterschied zu Zugfahrten ist, dass sich die Wagenkomposition und das Bremsverhalten laufend ändert. Daher ist das Bremsverhalten entsprechend anzupassen. Hierbei wird durch die/den TriebfahrzeugführerIn des Vershubtriebfahrzeugs zu Beginn einer jeden Vershubfahrt manuell gebremst und er hat somit einen Referenzwert über das Bremsvermögen seines Zuges. Für weitere Bremsungen mit dieser Wagenkomposition ist ihr/ihm somit bekannt, wann der Bremseninsatzpunkt sein muss. Beim Einsatz einer automatisierten Vershubeinheit kann dies nicht in ebendieser Form durchgeführt werden. Vielmehr muss für den Zug eine entsprechenden Bremskurve ermittelt werden. Beim europäischen Zugsicherungssystem ETCS werden die Bremskurven der Zugfahrten ermittelt und die Einhaltung dieser wird überwacht. So kommen Lambda- und Gammamodelle zur Anwendung. Kommt die automatische Vershubeinheit zur Anwendung, gibt es zwei Möglichkeiten zur Ermittlung des Bremsvermögens. Entweder es liegt keine Information über die Bremsleistung des Zuges vor, dann ist in einer Probebremsung zu Beginn das Bremsverhalten durchzuführen. Dadurch wird einerseits die Bremsaufbauzeit und auch die reale Bremskraft erhoben. Oder es wird durch die kontinuierliche Datenübertragung durch die Digitale Automatische Kupplung die gebremste Masse und das Gesamtgewicht übertragen. Somit können die Bremsleistung ermittelt werden. Es kommt daher ein Lambdamodell zur Anwendung, da sich die Komposition des Wagenverbandes in jedem Szenario ändert. Im Zuge des Projekts wurden verschiedene Szenarien festgelegt. Dabei wurde mit variierender Zuglänge als auch unterschiedlicher Bremsstellung (G/P) und unterschiedlichen Bremsleistung gearbeitet. Beispielsweise wurde ein Zug mit 200 m Länge in Bremsstellung G mit 50 Bremsleistung betrachtet. Das würde in der Realität einem Triebfahrzeug der Baureihe 2070 mit 12 Eanos Güterwagen entsprechen. Bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h würde hier der Bremseninsatzpunkt einer Betriebsbremsung 390 m vor dem Ziel (End of Authority) liegen. Die Schnellbremsung würde in etwa 160 m vor dem Ziel liegen. Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit wurde in dieser Betrachtung auch auf Durchrutschwege verzichtet. Diese kommen in Österreich erst ab 40 km/h zur Anwendung (siehe Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung – EisbBBV). Daher liegt auch die Supervised Location an derselben Stelle wie die End of Authority.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Bremskurve des beschriebenen Beispiels (200 m Länge, Bremsstellung G, 50 Bremsleistung):

Mobilität der Zukunft

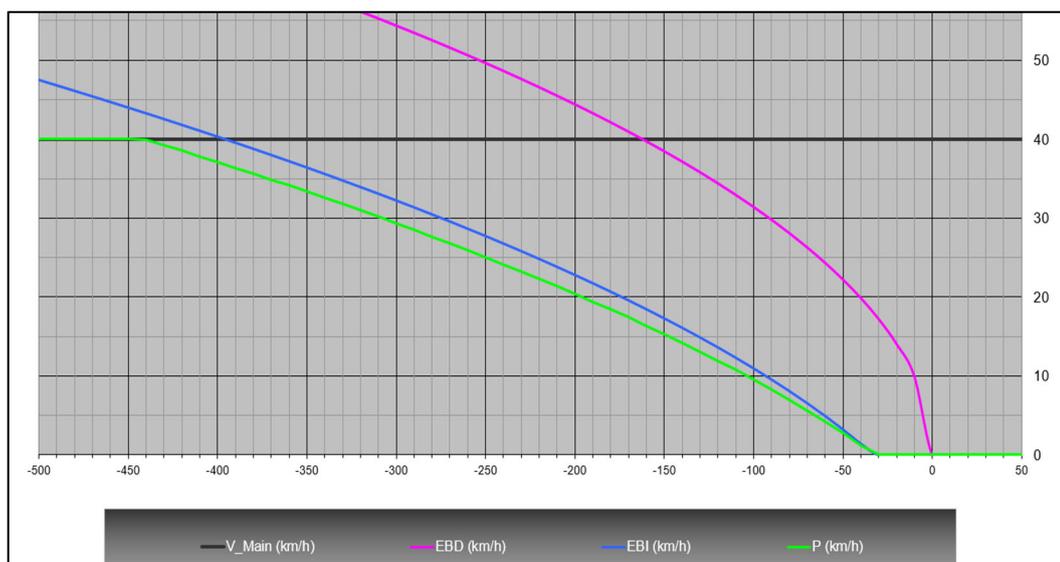


Abbildung 1 Bremsverhalten

An dieser Stelle sei anzumerken, dass durch Anpassen der Bremskurven der Bremsesatzpunkt verändert werden kann. Restriktivere Bremskurven führen zu flacheren Bremskurven, was einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit hat.

Einbindung der automatisierten Verschubprozesse in Supply Chains:

Die Automatisierung der Verschubprozesse, speziell durch den Einsatz von DAK5 und automatischer Bremsprobe können die Kosten des Verschubes in der Fläche erheblich senken. Damit kann der Ein-Personen-Betrieb umgesetzt werden, wodurch die zweite Person, die derzeit noch für die meisten Beistell- und Abholfahrten bei Kunden mit Anschlussbahn erforderlich ist, wegfällt. Dabei liegt nicht die Einsparung der zweiten Person im Fokus, sondern eher die Chance dem Fachkräftemangel, der speziell im harten Verschubbetrieb ein immer größer werdendes Problem darstellt, entgegenzuwirken. Allerdings ist hier noch die Fragestellung zu lösen, wie die Vorschriften zur Sicherung der Eisenbahnkreuzungen (EK) ohne Sicherungsanlage auf Anschlussbahnen abgeändert werden könnten bzw. welche zusätzlichen Sicherungssystem vorzusehen sind, um auch die Zustellung von Wagen und Wagengruppen ohne zweite Person durchzuführen.

Mit der Ausstattung der Bahnfahrzeuge mit DAK und automatischer Bremsprobe können Verschubvorgänge in deutlich kürzerer Zeit abgewickelt werden, wodurch die Wagen schneller in die Verschubknoten kommen, um dem Hauptlauf zugeführt zu werden.

Mobilität der Zukunft

Blickt man noch weiter in die Zukunft und bezieht hoch automatisierte, selbstfahrende Güterwagen in die Überlegung mit ein, so ergeben sich vereinfachte Vorgänge, die ohne zusätzliche Triebfahrzeuge und Vershubpersonal auskommen. Dabei ist allerdings eine geschlossene Informationskette eine Grundvoraussetzung, bei der von der Bestellung des Wagens bzw. der Wagengruppen über automatisierte Beistellung bis zur Zuführung zum Hauptlauf auf der Hauptstrecke alle Informationen an die relevanten Akteure bzw. Komponenten zeitgerecht zur Verfügung gestellt werden.

2.2.3. Sensorik

Hinderniserkennung:

Es wurde ein Sensorrahmen entwickelt, auf welchem alle Sensoren für die Umfeldsensorik angebracht werden können. Für Testfahrten kann dieser einfach an der Front des Vershubfahrzeugs befestigt werden.



Abbildung 2 Sensorsystem an einer ÖBB 2070 Vershublok

Die Rohdaten der einzelnen Sensoren werden durch eine für jeden Sensortyp eigens entwickelte Software gefiltert und anschließend einzelne Objekte/Hindernisse extrahiert. Ziel ist hierbei bei möglichst niedriger Rate an False-Positives alle Hindernisse zuverlässig zu detektieren. Alle detektierten Objekte werden anschließend an eine Sensorfusion, der

Risikoanalyse und das Reaktionsmodell gesendet. Dabei wurde die in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Softwarearchitektur verwendet. [1]

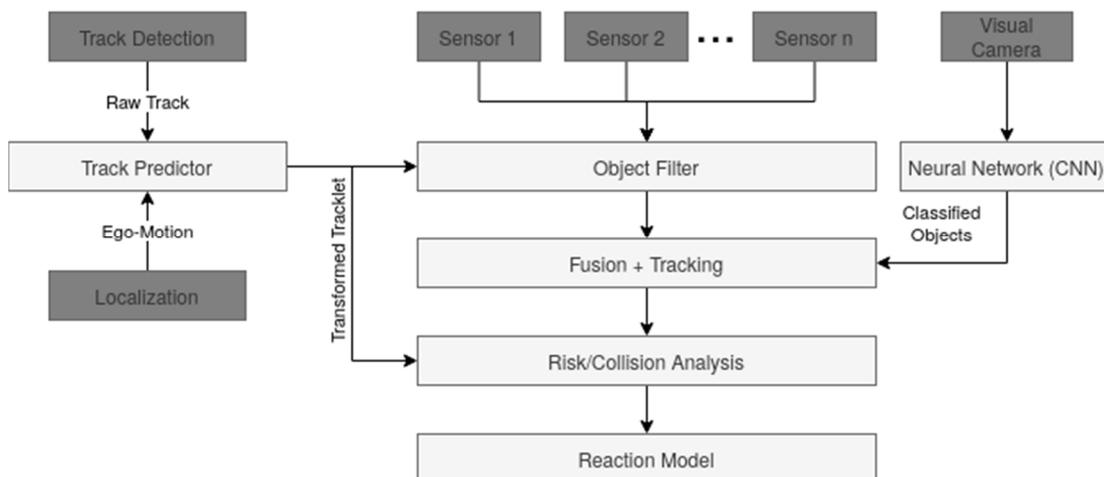


Abbildung 3 Softwarearchitektur der Hinderniserkennung

Im Zuge der Feldtests wurden Sensordaten aufgezeichnet und im Labor für Tests und Optimierungen der Algorithmen verwendet. Die Ergebnisse wurden als Kameraoverlay und in einem 3D Modell visualisiert und evaluiert.

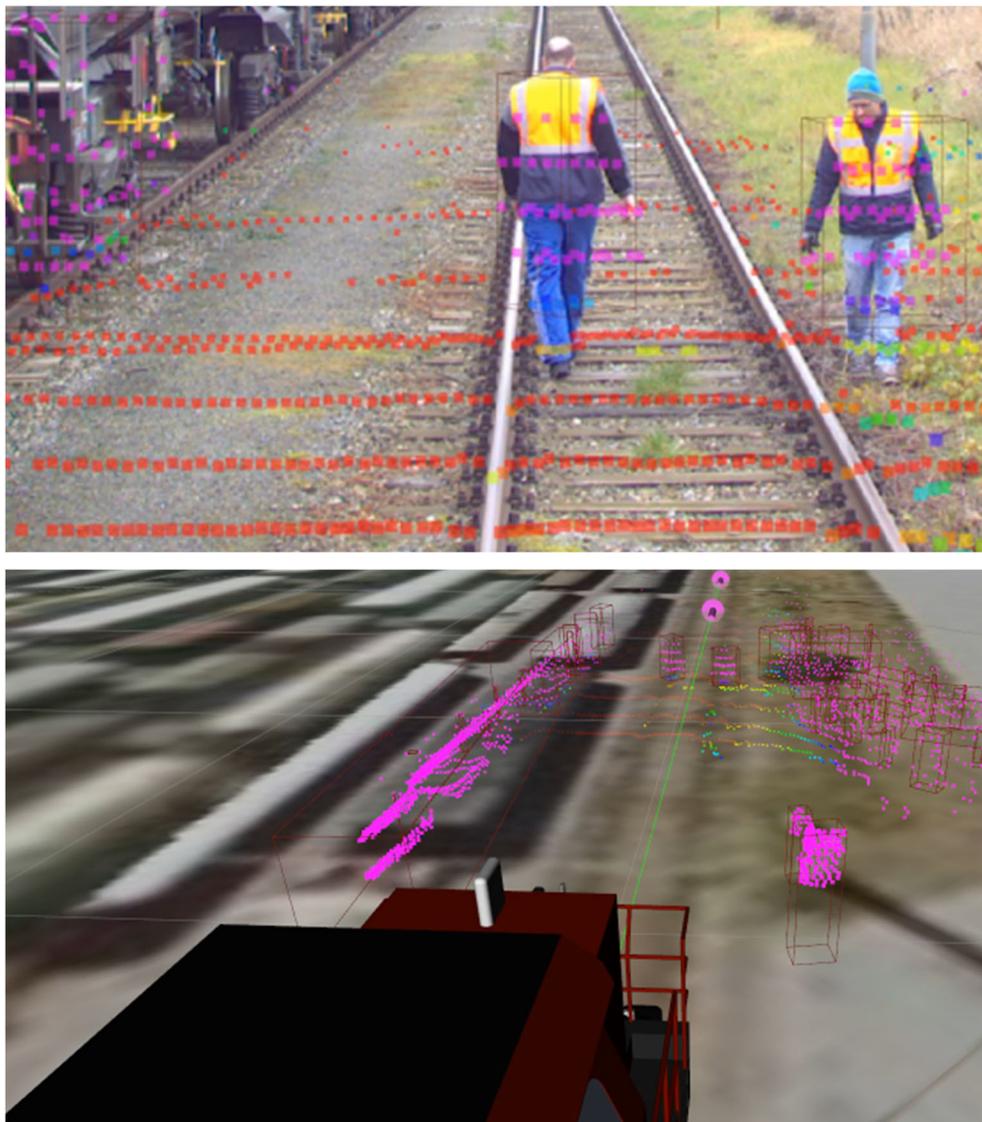


Abbildung 4 Visualisierung von autoSHUNTING, Personen werden im Lichtraum detektiert; (oben) Visualisierung mittels Kameraoverlay; (unten) Visualisierung mittels 3D-Modell.

Hinderniserkennung bei geschobenen Fahrten:

Mögliche Lösungsansätze wurden beschrieben und evaluiert. (1) Durch Montage eines Sensormoduls an der Zugspitze könnte so der Lichtraum überwacht werden. Das Modul muss allerdings durch Personal angebracht und auch wieder entfernt werden. Zudem muss eine sichere Datenübertragung zum Verschubfahrzeug gewährleistet werden können. (2) Der Spitzenverschieber überwacht den Lichtraum und kann mittels Fernbedienung die automatische Verschublok jederzeit anhalten. (3) Eine autonome Drohne liefert eine Live-Videoübertragung von der Zugspitze an die Verschublok. An dieser Stelle ist es auch möglich, eine solche Drohne mit einem LIDAR Sensor auszustatten und einen kompletten 3D-

Laserscan des Bereichs, um die Zugspitze an das Verschubfahrzeug zu senden. In einem ersten Test wurde im Verschubbahnhof Wien Kledering eine Verschubfahrt mit einer teleoperierten Drohne begleitet, um die Qualität der gewonnenen Daten bewerten zu können. Die Drohne flog dabei etwa 10 Meter über der Zugspitze und lieferte die Videoaufnahmen live in das Führerhaus der Verschublok.

Hochpräzise Zugortung:

Neben der eigens entwickelten Zugortung wurde im Laufe des Projekts eine Schnittstelle zum ÖBB internen Projekt Greenlight entwickelt. Auf diese Weise konnte autoSHUNTING auf die bereits bestehende ÖBB-Lokalisierung zugreifen und somit redundante Sensoren einsparen als auch von den ÖBB internen GPS-Korrekturdaten profitieren. Die Schnittstelle wurde bei mehrfachen Testfahrten auf Funktion und Zuverlässigkeit getestet und weiterentwickelt.

Annäherungssensorik beim Kuppeln:

Die Annäherungssensorik besteht aus drei Komponenten. Auf größere Distanz werden Wagen als Hindernis erkannt und das System nähert sich mit einer Zielbremsung langsam an. Ab einer Distanz von etwa fünf Meter ermitteln 1D Laser-Distanzsensoren den exakten Abstand zwischen Verschubfahrzeug und Prallplatten der Dämpfer am zu kuppelnden Wagen. Zuletzt erkennt der Beschleunigungssensor den eigentlichen Kupplungsvorgang.

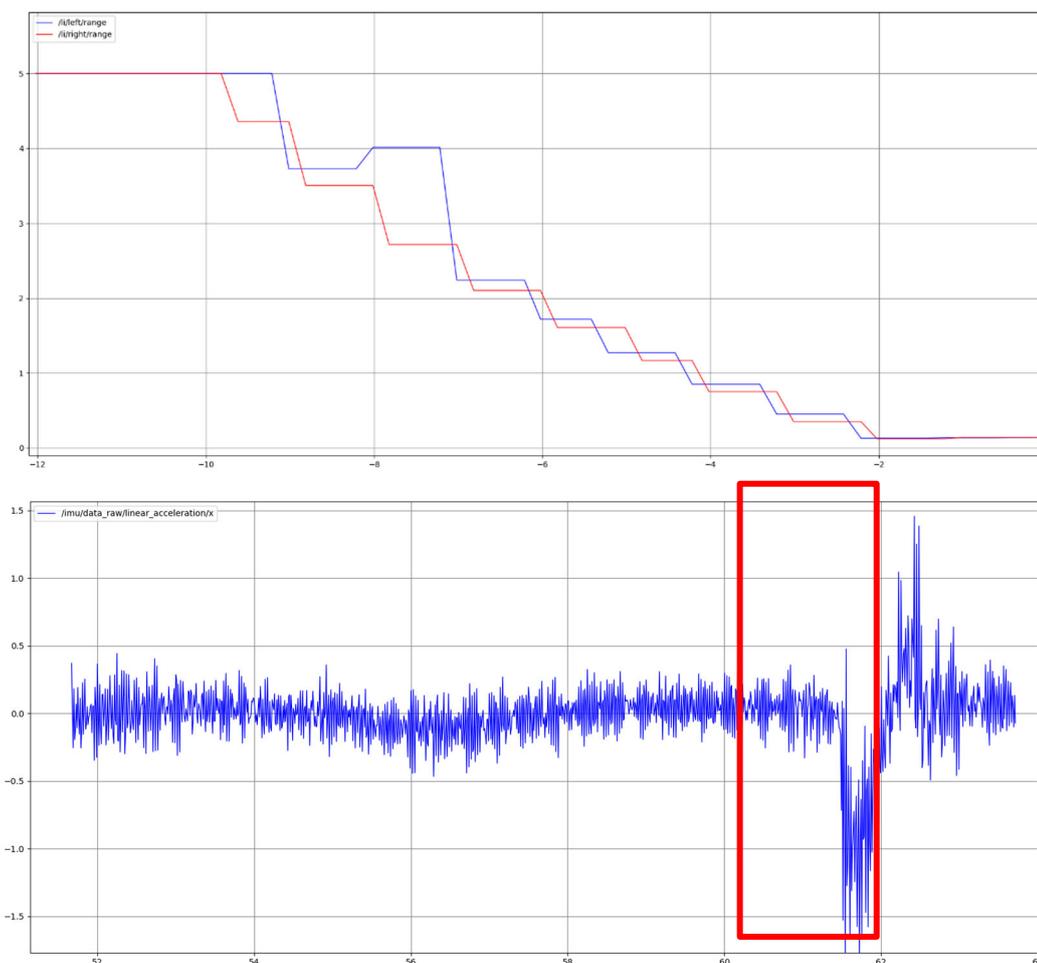


Abbildung 5 Sensormesswerte bei Kuppelprozess mit RK900; Distanzmessung der 1D-Laserdistanzsensoren links/rechts (oben); Beschleunigungsmessung in Fahrtrichtung mittels IMU (unten)

Wie in den Abbildungen zu sehen, kann der gesamte Kuppelprozess mittels entsprechender Sensoren genauestens überwacht werden. Die 1D Laserdistanzsensoren liefern einen exakten Abstand und erlauben so ein vorsichtiges Annähern an den Wagen. Die Beschleunigungsmessung der IMU liefert bei physikalischem Kontakt einen signifikanten Ausschlag. Das System muss anschließend mittels Gegenzugprobe das erfolgreiche Kuppeln zwischen Wagen und Schubfahrzeug überprüfen. Die Einführung der neuen Kupplung DAK (Digitale Automatische Kupplung) wird diesen Prozess signifikant vereinfachen, da diese über Sensoren und eine elektrische Bedienung verfügt.

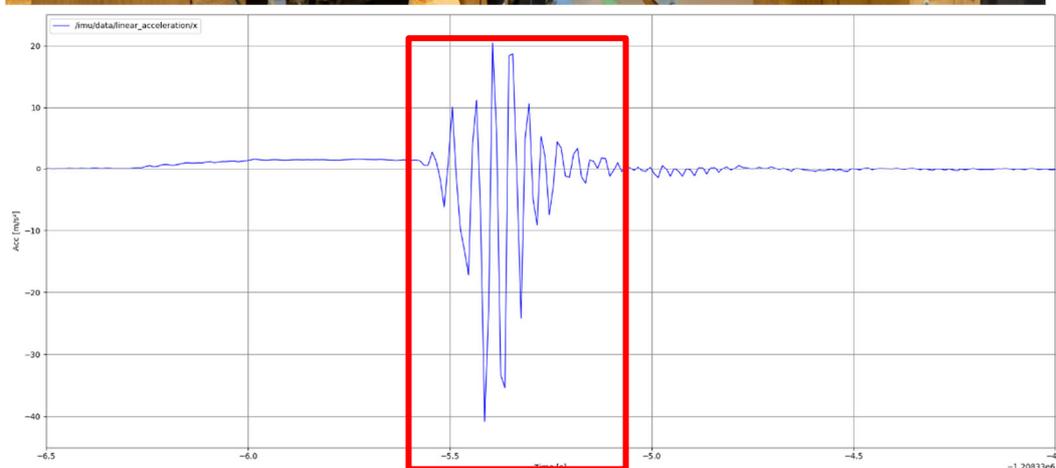


Abbildung 6 Sensormesswerte bei Kuppelprozess mit DAK; (oben) DAK-Versuchsaufbau; (unten) Beschleunigungsmessung in Fahrtrichtung mittels IMU

Die aufgenommenen Messdaten am DAK-Prüfstand der FH OÖ zeigen, dass die Erkennung des Kupplungsvorgangs prinzipiell in gleichartiger Weise erkennbar ist, wie bei der Schraubenkupplung bzw. der RK900. Ein Test mit einem echten Fahrzeug war nicht möglich, da derzeit keine Lokomotive, die mit einer DAK ausgerüstet ist, zur Verfügung steht.

Gleisdetektion:

Der Streckenverlauf vor dem Fahrzeug wird durch eine Gleisdetektion automatisch mittels Videokameras und spezieller Software erkannt, um den Lichtraum für die Hinderniserkennung zu definieren. Ein Machine Learning Netzwerk führt eine sogenannte semantische Segmentierung durch, wobei jeder Pixel einer vordefinierten Klasse zugeordnet wird. Aus allen Pixeln der Klasse „Gleis“ können entsprechende Algorithmen dann alle möglichen Fahrwege ermitteln.

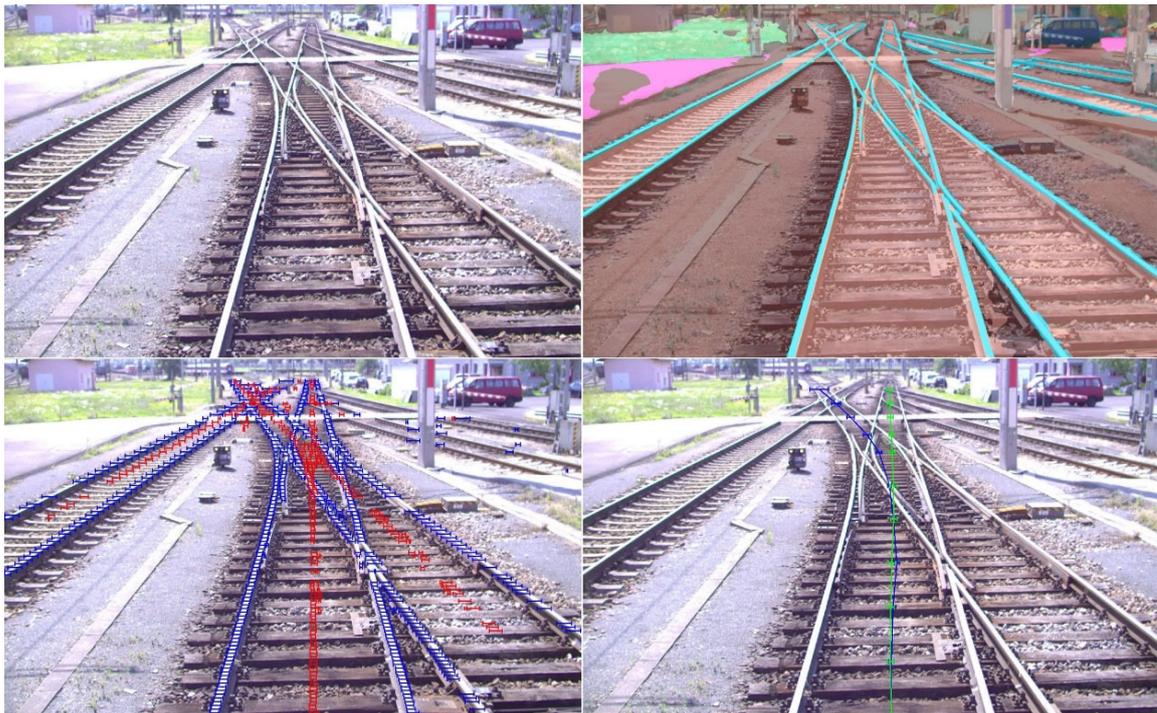


Abbildung 7: RGB-Bild (links oben); Machine Learning Output (rechts oben); Extrahierte Gleis- und Streckenpunkte (links unten); Interpolierte mögliche Streckenverläufe (rechts unten)

In mehreren Feldtests konnte das Sensorsystem bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen getestet werden. Bei tiefstehender Sonne kam es wie erwartet zur Blendung, allerdings konnte ein zusätzliches Sonnendach für das Kameragehäuse diesen Effekt weitgehend reduzieren. Bei Nachfahrten reichten die Streckenbeleuchtung und die Fahrzeugscheinwerfer aus, um noch gute Resultate von der Bildverarbeitung zu erhalten. Obwohl das Bild für das menschliche Auge bereits sehr dunkel wirkt, beinhaltet es noch genügend Informationen für den Machine Learning Algorithmus, um einen Streckenverlauf zu detektieren.

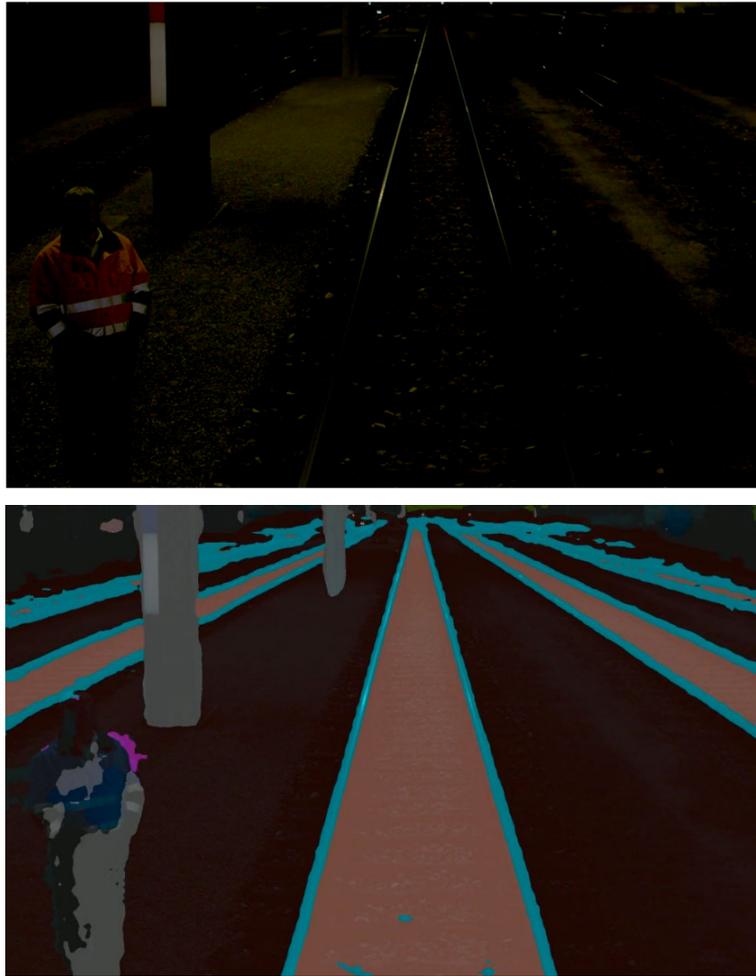


Abbildung 8: Nachtaufnahme des Gleisverlaufs (oben); Resultat des Machine Learning (unten)

Wie in Abbildung 7 zu sehen, liefert der Algorithmus für die Gleisdetektion alle möglichen Fahrwege unabhängig von den aktuellen Weichenstellung. Die automatische Detektion der aktuellen Weichenstellung auf mittlere und größere Distanz, stellte sich als äußerst schwierig heraus. Basis für die Erkennung der Weichenlage ist der Output des trainierten Machine Learning Netzwerks. Wie in Abbildung 9 deutlich zu erkennen, wird die Weichenzunge dennoch erst auf kurze Distanz (~10m) deutlich sichtbar.

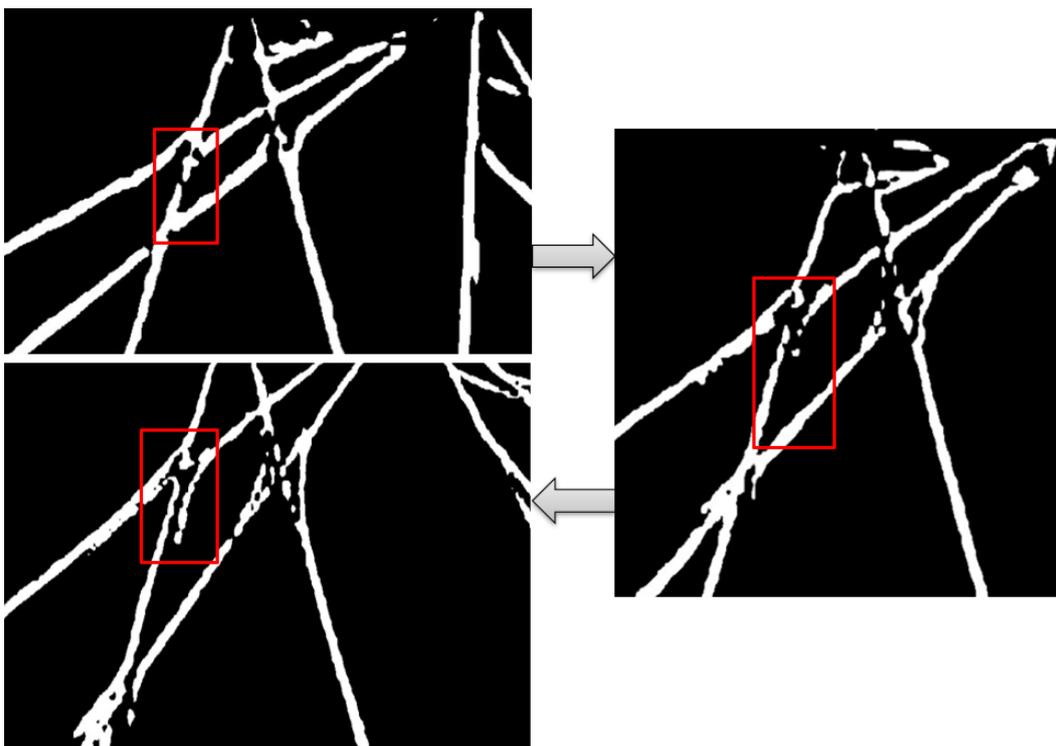


Abbildung 9: Gleisdetektion Machine Learning Output. Weichenzunge wird erst auf kürzere Distanz klar erkennbar

Bezüglich der Verwendung der Weichensignalkörper für die Erkennung der Weichenlage bei manuell gestellten Weichen siehe den nachfolgenden Abschnitt. Abschließend wurde eine Schnittstelle zum ÖBB internen Projekt Greenlight entwickelt, welche es erlaubt auf Streckenabschnitten mit elektrischen Stellwerken Informationen über aktuelle Weichenstellungen sowie die Signalzustände zu erhalten. Siehe dazu Abschnitt 2.2.5.

2.2.4. Signalerkennung

Form- und Lichtsignale:

Im Projekt wurde eine Liste an Signalen definiert, welche für dieses Projekt relevant sind. Mit geeigneten Bildern für diese definierten Signale wurde das Machine Learning Netzwerk trainiert. Die dafür erforderlichen Bilder und Videosequenzen wurden in einem Verschubbahnhof und bei Verschubfahrten aufgenommen. Nach Abschluss des Trainings des Machine Learning Netzwerks konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Für Testzwecke wurde in diesem Netzwerk noch die visuelle Detektion von Personen als eigene Objektklasse hinzugefügt. Diese Information kann potenziell dazu genutzt werden, um Personen frühzeitig bereits außerhalb des Einsatzbereichs der Hinderniserkennung zu detektieren. Von der Hinderniserkennung detektierte Personen können zudem auf diese Weise auch als solche

klassiert werden, um besondere Vorsicht gegenüber Menschen durch die Risikoanalyse zu veranlassen.

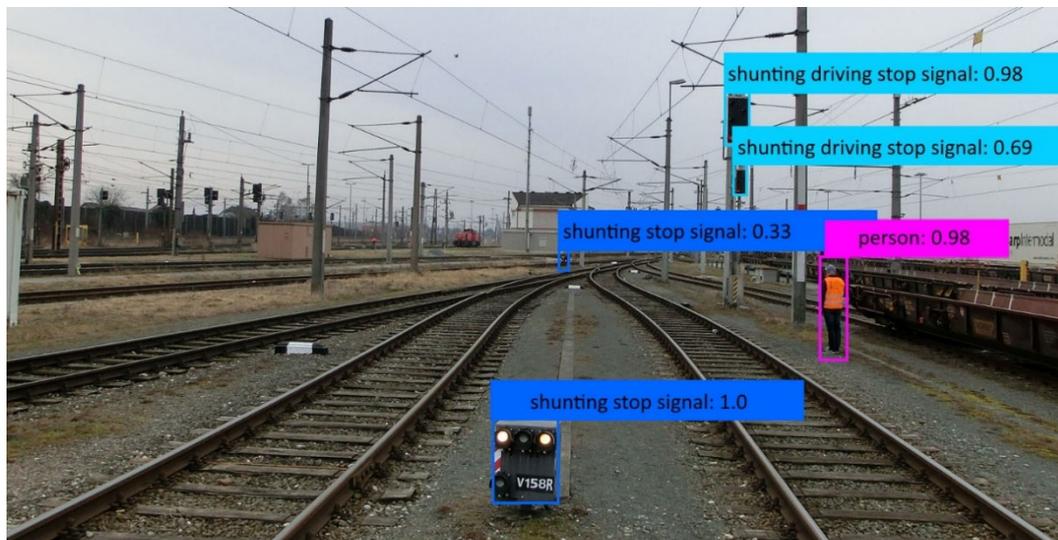


Abbildung 10 Visuelle Erkennung von Form- und Lichtsignalen

Weichensignalkörper:

Um die bereits zuvor behandelte visuelle Gleisdetektion zu vereinfachen, wurde an dieser Stelle eine Erkennung der Weichensignalkörper implementiert, ähnlich der Form- und Lichtsignalerkennung. Damit kann die Weichenstellung visuell mit Machine Learning anhand ihrer zugehörigen Weichensignalkörper ermittelt werden. Möglich ist das nur bei manuell gestellten Weichen, da nur diese mit einem Weichensignalkörper ausgestattet sind. Modernere an ein elektrisches Stellwerk angeschlossene Weichen können allerdings über die neu entwickelte Schnittstelle zu Greenlight (siehe Abschnitt 2.2.5) ausgelesen werden. Um das Machine Learning Netzwerk (CNN) zu trainieren wurden kurze Videosequenzen aufgenommen und anschließend eine große Anzahl an Einzelbildern extrahiert. Die Resultate waren sehr gut, allerdings deckt der derzeitige Stand nicht alle denkbar vorkommenden Varianten ab.

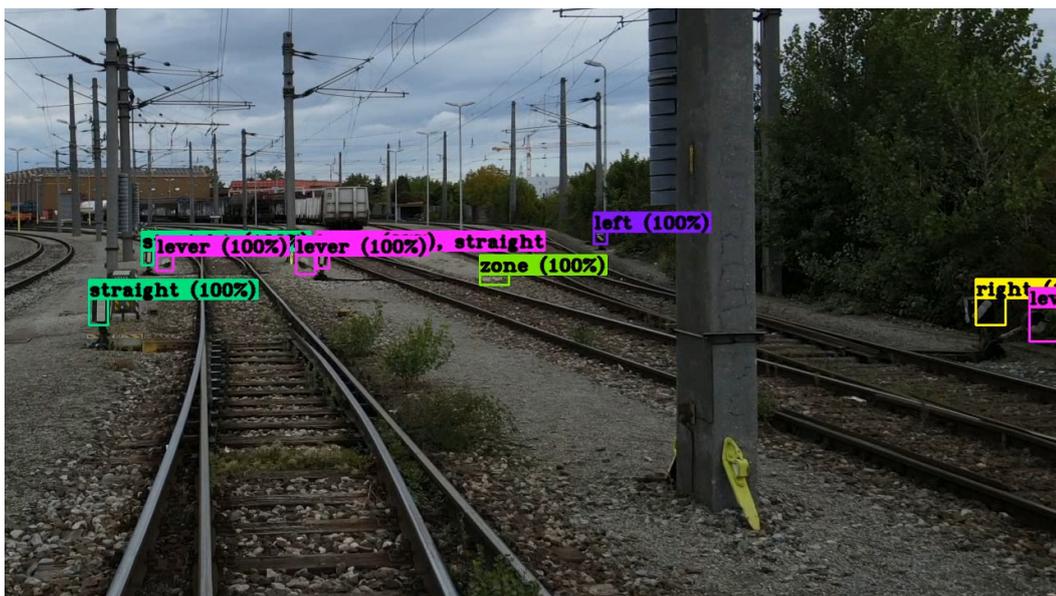


Abbildung 11: Detektion von Weichenmarkern.

2.2.5. Prozesssteuerung und Systemintegration

Zur Nutzung der Synergien wurde im Rahmen von autoSHUNTING eine Kommunikationsschnittstelle zum ÖBB internen Projekt Greenlight entwickelt und getestet. Das Projekt Greenlight kann zwei für autoSHUNTING sehr interessante Datensegmente zur Verfügung stellen. (1) Greenlight verfügt über eine hochgenaue Lokalisierung der Verschublok, welche auch die ÖBB internen GPS-Korrekturdaten verwendet und (2) verfügt das System über einen lokalen Streckenatlas und kann Weichen- und Signalstellungen auf Basis der Daten lokaler Stellwerke übertragen. Die Verwendung dieser Daten vereinfachen die Aufgaben von autoSHUNTING, da teure Hardware für die Lokalisierung eingespart werden kann und die Gleiserkennung inkl. Fahrstraßen zuverlässiger wird.

Zur Umsetzung wurden Schnittstellen zu den relevanten Subsystemen von Greenlight entwickelt. Diese erlauben freien Zugriff auf Daten wie die Eigenortung der Verschublok, sowie Informationen über den Streckenverlauf im Verschubbahnhof und aktuelle Weichen- und Signalstellungen.

Strecken- und Signaldaten:

Das Interface ist ein auf TCP/IPv4 basierender Websocket Server und sendet zyklisch Informationen an verbundene Clients. Es wäre grundsätzlich möglich Informationen über den

gesamten Vershubbahnhof zu bekommen, für autoSHUNTING ist jedoch nur der Bereich vor/hinter dem Fahrzeug interessant. Aktuell werden folgende Daten übermittelt:

- WKT-Linie: Punkte im Weltkoordinatensystem, welchen den Streckenverlauf vor dem Fahrzeug in Fahrtrichtung beschreiben. Aktuelle Weichenstellungen sind dabei bereits berücksichtigt. Im Falle eines Stoppsignals wird nur der Streckenverlauf bis zum entsprechenden Signal übermittelt.
- Länge: Länge/Distanz des übermittelten Streckenverlaufs.
- PoI ID: Identifikation des nächsten Point-of-Interest (z.B. Stoppsignal).

Ortungsdaten:

Das Interface ist ein proprietäres Protocol der Firma iMAR namens iXCOM und basiert auf dem TCP/IPv4 Standard. Es erlaubt das Auslesen der Sensor- und Filterwerte der Eigenortung des Vershubfahrzeugs. Aktuell werden folgende Daten zyklisch ausgelesen:

- Position des Fahrzeugs im Weltkoordinatensystem.
- Orientierung/Ausrichtung des Fahrzeugs im Weltkoordinatensystem.
- Geschwindigkeit des Fahrzeugs im Weltkoordinatensystem.
- Geschwindigkeit des Fahrzeugs in Fahrtrichtung, ermittelt durch das Odometer.
- Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten, ermittelt durch die IMU (Inertial Measurement Unit).

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Weichenstellungen und Signale nur für jene Bereiche zur Verfügung stehen, welche auch von einem elektrischen Stellwerk gesteuert werden. In Bereichen mit manueller Weichenstellung muss auf die visuelle Detektion von Signalen und Weichenstellung zurückgegriffen werden. Eine Übersicht der Systemarchitektur bei einer gemeinsamen Verwendung von Greenlight und autoSHUNTING ist in Abbildung 12 zu sehen. Die ausgegrauten autoSHUNTING-Module können dabei teilweise eingespart werden. Die Signalerkennung wird weiter benötigt, sollte ein Streckenbereich nicht von einem elektrischen Stellwerk gesteuert werden.

Mobilität der Zukunft

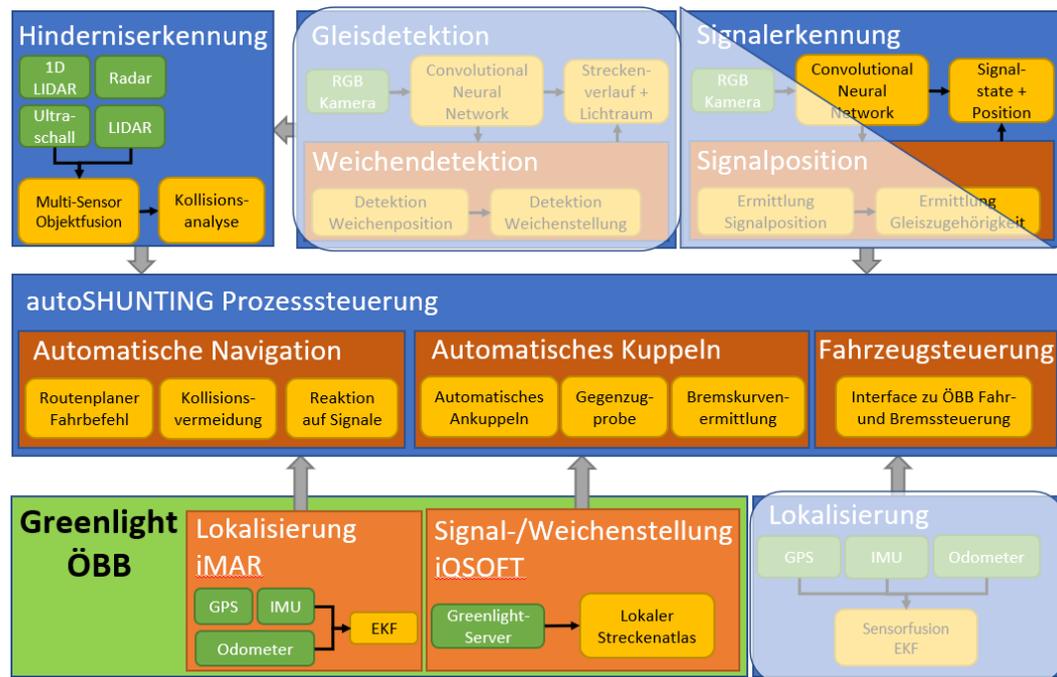


Abbildung 12 Systemübersicht für Fusion von autoSHUNTING mit Greenlight.

2.2.6. Feldtests

Im Verlauf des Projektes wurden Feldtests durchgeführt, um die Systeme bei unterschiedlichen Verhältnissen zu testen.

Die Feldtests fanden an verschiedenen Tagen in den Bahnhöfen Wels Vbf, Wien Kledering Vbf und Kaiserebersdorf statt. Als Lokomotive wurde jeweils eine Verschieblok der Reihe 2070 verwendet, die mit der autoSHUNTING Sensorik ausgerüstet wurde.

Getestet wurden Verschiebprozesse unter realen Bedingungen mit unterschiedlichen Licht- und Wetterverhältnissen:

- Funktionstests für Lokalisierung und Hinderniserkennung
- Unterschiedliche stationäre und bewegliche Hindernisse (Personen und Objekte)
- Verschiebfahrten mit und ohne Kuppelvorgängen
- Verschiebfahrten bei tiefstehender Sonne und in der Nacht
- Test der Signalerkennung
- Gesamttests zwischen autoSHUNTING und Greenlight
- Tests mit einer Drohne zur Überwachung der Zugspitze bei geschobenen Fahrten

Mobilität der Zukunft

Aus den gesammelten Daten wurde auf Basis von Laborsimulationen des Gesamtsystems ein Video erstellt, das die Ergebnisse von autoSHUNTING in Bezug auf die Hinderniserkennung und die Möglichkeiten des automatischen Verschubs demonstriert.

Dieses Video ist unter <https://youtu.be/xttqcKyMUHQ> abrufbar.

2.2.7. Begleitforschung

Im Rahmen der Begleitforschung wurde die Auswirkung verschiedener Technologien und Teilsysteme untersucht: Die ursprünglich vorgegebenen Technologien bzw. Systeme wie Automatische Kupplung, Selbstfahrender Güterwagen und automatisierte Bremsprobe wurden im Detail betrachtet. Allerdings wurde die Technologie des Entkupplungsroboters für Schraubenkupplungen wegen der zukünftigen Umstellung auf die DAK nicht mehr weiterverfolgt.

- Automatische Kupplung auch Digitale Automatische Kupplung (DAK):

Diese Kupplung stellt nicht nur eine mechanische Verbindung von 2 Eisenbahnfahrzeugen her, sondern verbindet auch gleichzeitig die Druckluftleitungen sowie etwaige Strom- und Kommunikationsleitungen. In ihrer höchsten Technologiestufe (DAK5) wird durch die Ansteuerung eines Stellmotors im Kupplungskopf (Ansteuerung von extern, z.B. Stellwerk, oder mittels Schalter am Wagen) auch das Entkuppeln ermöglicht. Die DAK stellt eine wesentliche Voraussetzung zur weitergehenden Automatisierung von Vershubtätigkeiten dar.

- Selbstfahrender Güterwagen:

Der selbstfahrende Güterwagen ist ein „konventioneller“ Güterwagen (Containertragwagen, Flachwagen, etc.), der mit einem eigenen Antrieb, idealerweise Elektroantrieb in Kombination mit Batteriespeicher, der während der Fahrt im Zugverband geladen werden kann, und Sensorik ausgestattet ist. Grundannahme des Gesamtsystems ist, dass alle Wagen auch mit einer DAK5 ausgestattet sind. Dabei werden die Güterwagen mit einem Verteilerzug von einem großen Vershubknoten zu den Bahnhöfen, die die Anschlüsse zu den Nebenbahnstrecken und Anschlussbahnen darstellen bzw. in der Nähe der Verbindungen zu den Anschlussbahnen sind, gebracht. Nach dem Abkuppeln vom Verteilerzug nimmt der selbstfahrende Güterwagen hoch automatisiert die Fahrt zu seinem Zielort auf. Bei der Rückfahrt ist diese Prozesskette entsprechend in die Gegenrichtung zu betrachten. Einziger Unterschied zu der Zustellfahrt ist der Umstand, dass die abzuholenden Güterwagen selbstständig an das Zugende fahren müssen, um dort anzukoppeln. Dazu sollte infrastrukturell zumindest ein Abstellgleis vorhanden sein, um die wartenden Wagen bzw. Wagengruppe aufzunehmen, bevor sie abgeholt werden.

Mobilität der Zukunft

Bei der Auslegung der Rahmenbedingungen, die ein solcher Güterwagen zu erfüllen hat, ist zwischen technischen Möglichkeiten und Wirtschaftlichkeit abzuwägen. Die Sensorik stellt ein komplexes System dar, dass neben den sensorischen Fähigkeiten auch die strengen rechtlichen Vorgaben im Bahnbetrieb bedient. Rein technisch kann festgehalten werden, dass je langsamer ein selbstfahrender Güterwagen unterwegs ist, umso geringer sind die Anforderungen an die Sensorik in Richtung Erfassungszeitraum und Reaktionszeit sowie die Leistungsfähigkeit des Antriebes. Daher wurde im gegenständlichen Projekt (siehe auch Kapitel Task 8.2) ein Fahrzeug für die Betriebssimulationen angenommen, das mit 10 km/h Höchstgeschwindigkeit unterwegs ist. Es konnte gezeigt werden, dass auf weniger stark frequentierten Nebenbahnen keinerlei Beeinträchtigungen des Regelverkehrs eintreten würden. Nimmt allerdings die Verkehrsdichte auf diesen Strecken zu, müssen die Sensorik und die Antriebstechnik auf höhere Geschwindigkeiten z.B. 60 km/h ausgelegt werden, um ein problemloses Berücksichtigen der selbstfahrenden Güterwagen im Regelbetrieb zu ermöglichen.

Allerdings müssten im Vorfeld einer möglichen Anwendung von selbstfahrenden Güterwagen auch die rechtlichen Regelungen angepasst werden. Ein besonders wichtiges Thema wäre, wie mit Eisenbahnkreuzungen (EK) umzugehen ist, welche nicht über eine technische Sicherung verfügen. Beispielsweise müssen gemäß den derzeitigen Vorschriften derartige Eisenbahnkreuzungen bei Anschlussbahnen oft durch Personal überwacht werden. Derzeit gibt es keinerlei Lösungsvorschläge wie diese Regelung angepasst werden könnte.

- Automatische Bremsprobe (ABP):

Die automatische Bremsprobe ermöglicht die Überprüfung der Bremsanlage eines neu zusammengestellten Zuges ohne Personal. Dazu gibt es verschiedenste Ansätze, die sich nach ihrem Einsatzgebiet unterscheiden.

Nach Einführung der DAK können in einem Vershubknoten Lösungen angewendet werden, die direkt in die Infrastruktur integriert sind.

Beim Vershub in der Fläche können Gerätschaften ähnlich der Lösung „WaggonTracker©“ der Firma PJM zur Anwendung kommen, die bereits ein System für die automatische Bremsprobe entwickelt haben und mit der SBB-Cargo gemeinsam testen. Für dieses System ist allerdings entsprechende Sensorik und eine Stromversorgung am Wagen vorzusehen. Mit der künftigen Anwendung der DAK kann die Stromversorgung sichergestellt werden. Damit entfallen nicht nur zeitaufwendige manuelle Prüfungen durch das Personal (Zeitersparnis bei einem 500m langen Zug ca. 30min), sondern es kann auch der als Zielprozess definierte „Ein-Personen-Betrieb“ im Flächenvershub ermöglicht werden.

Prozesssimulation:

Dieser Task lief in direkter Abstimmung mit der Prozessbeschreibung im Abschnitt 2.2.2, in dem die Vershubprozesse im eigentlichen Bahnbetrieb untersucht und in detaillierten Prozessbeschreibungen aufbereitet wurden. Hier wurden jene Prozesse betrachtet, die die Einbindung von selbstfahrenden Güterwägen in den Bahnbetrieb simulieren sollen. Dazu wurde ein Simulationsnetz für den Bahnbetrieb in der Bahnbetriebssimulationssoftware OpenTrack erstellt. Dieses Simulationsnetzwerk bildet den Streckenabschnitt der Südbahn vom Bahnhof „Wien Meidling“ bis Bahnhof „Wiener Neustadt“ ab und beinhaltet auch die Abzweigungen in die Leobersdorferbahn ab Bahnhof „Leobersdorf“ bis Bahnhof „Enzersfeld-Lindabrunn“ und in die innere Aspangbahn im Bahnhof „Sollenau“ bis Anschlussbahn Fa. TBA Austria. Im betrachteten Simulationsnetzwerk wurde der öffentlich verfügbare Personenverkehrs-Fahrplan 2021 plus eine plausible Annahme für Güterzüge als Ausgangsbasis hinterlegt. Im Zuge der Untersuchungen wurde mit unterschiedlichen Anzahlen von Güterzügen gearbeitet, um die möglichen Beeinflussungen der hoch automatisierten, selbstfahrenden Güterwagen auf den Regelbetrieb zu untersuchen. Es wurde ein Szenario mit einer Maximalgeschwindigkeit der Güterwagen von 10 km/h gerechnet. Hier zeigte sich, dass mit dem aktuellen Verkehrsaufkommen auf der Leobersdorferbahn keinerlei Beeinflussung durch die selbstfahrenden Güterwägen zu erwarten wäre. Auf der Inneren Aspangbahn zeigte sich, dass ein wesentlicher Stellhebel jene Zeit ist, in der die Strecke nicht für reguläre Zugfahrten (Personenzüge) zur Verfügung steht. Kann diese möglichst kurzgehalten werden, und der Aufenthalt und die Manipulationen in die Anschlussbahnen verlegt werden, so kommt es zu weniger Beeinflussung. In einem weiteren Szenario wurde mit einem erhöhten Verkehrsaufkommen auf der Leobersdorferbahn (Annahme Zugverdichtung beim öffentlichen Verkehr auf 15 min Intervall) und einer Maximalgeschwindigkeit von 60 km/h der selbstfahrenden Güterwagen gerechnet. Es konnte eine erfolgreiche Integration der Güterwagen in den Regelbetrieb bestätigt werden. Dies ist auf dieser Strecke sehr einfach gelungen, da manche Streckenabschnitte zustandsbedingt nur eine Maximalgeschwindigkeit 60 km/h zulassen.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (inkl. LCC):

Bei der Betrachtung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen muss vor allem der Fakt berücksichtigt werden, dass die zu erwartenden wirtschaftlichen Vorteile vorab erhebliche

Vorlaufkosten zur Entwicklung, dem Bau der Komponenten und der Integration in das Eisenbahnsystem bedingen.

Als Grundannahme für die Berechnungen wurde eine durchgehende Ausstattung der Güterwagen mit einer DAK5 und einer Vorrichtung zur automatisierten Bremsprobe angenommen. Genaue Kostenangaben konnten wegen der Sensibilität der Daten nicht erhalten werden.

Für die status-quo Verschubfahrt wird angenommen, dass zwei Mitarbeitende (MA) notwendig sind, die Triebfahrzeuge (Tfz) bedienen dürfen. Für die teilautomatisierte Verschubfahrt ist nur mehr ein MA notwendig. Zusätzlich sind in diesem Fall die Kosten für die Nachrüstung der DAK5 und der Ausrüstung für das automatisierte Fahren (autoSHUNTING Hardware) zu berücksichtigen. Die Einsparung der zweiten Person ist zwar wirtschaftlich sinnvoll, aber im Hinblick auf den bestehenden Fachkräftemangel speziell im harten Verschubbetrieb auch eine Chance diesem entgegenzuwirken.

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsberechnung zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit gegeben ist, auch wenn die Investitionen dafür erheblich sind und auch noch nicht abschließend quantifiziert werden können.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Projekt autoSHUNTING folgende neue Ergebnisse erzielt werden konnten:

- Verschubprozesse wurden im Hinblick auf die zukünftige Automatisierung systematisch erfasst und analysiert.
- Eine Vorgehensweise für die schwierige Automatisierbarkeit der Bremsberechnung bei automatisch fahrenden Verschubeinheiten wurde aufgezeigt.
- Es wurde gezeigt, dass der Einsatz moderner Sensortechnologien zur Erkennung von Hindernissen, Signalen, Weichen und des Gleisverlaufes in einem Verschiebebahnhof funktioniert und auch bei schlechten Sichtverhältnissen anwendbar ist.
- Eine modulare Systemarchitektur für ein automatisch fahrendes Verschubfahrzeug wurde entwickelt und im Demonstrator umgesetzt.
- Die verwendete Architektur der Hinderniserkennung basiert nur in wenigen Aspekten auf künstlicher Intelligenz, was für eine allfällige spätere Zulassung von erheblichem Vorteil ist.

- Der Demonstrator wurde bei Testfahrten in realer Umgebung von Verschubbahnhöfen inkl. dem Test von Kuppelversuchen verwendet.
- Die mögliche Nutzung von Synergien zwischen den fahrzeugseitigen Modulen von autoSHUNTING und den im Projekt Greenlight vorhandenen Daten wurde demonstriert.
- Simulationen haben gezeigt, dass auch ein Einsatz von selbstfahrenden Güterwagen in der Zukunft im realen Bahnbetrieb bei der Last-Mile-Zustellung möglich ist.

Ausblick und offene Fragen:

Im Zuge weiterer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sollten unter anderem folgende Fragestellungen weiterverfolgt werden. Viele dieser Themen werden in den derzeit (bis 2024 bzw. bis 2026) laufenden Projekten DACIO (BMK bzw. FFG) und dem ER-JU Projekt TRANS4M-R behandelt:

- Weiterentwicklung der Prozessdefinitionen, Use Cases und Sicherheitsanalysen auf europäischer Ebene.
- Standardisierte Spezifikationen für eine Schnittstelle zwischen Vershubfahrzeug und Infrastruktur, da „ATO over ETCS“ für die Vershubanwendungen nicht alle notwendigen Daten zur Verfügung stellt und es außerdem aus heutiger Sicht sehr unwahrscheinlich, dass alle Vershubbereiche mit ETCS ausgerüstet werden.
- Weitergehende langfristige Erprobungen von autonomen Vershubeinheiten.
- Weiterentwicklung von Lösungsansätzen zur Überwachung geschobener Vershubeinheiten.

4. Literaturverzeichnis

- [1] Stadlmann B., Penkner T., Schneider G., Zöchmeister K., Wagner A., Zajicek J.: Automatic Shunting Operations (ASO) – Aspects for the Technical Solution, International Railway Conference, August 2022, Montpellier

5. Anhang

5.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Bremsverhalten.....	10
Abbildung 2 Sensorsystem an einer ÖBB 2070 Vershublok.....	11
Abbildung 3 Softwarearchitektur der Hinderniserkennung	12
Abbildung 4 Visualisierung von autoSHUNTING, Personen werden im Lichtraum detektiert; (oben) Visualisierung mittels Kameraoverlay; (unten) Visualisierung mittels 3D-Modell.....	13
Abbildung 5 Sensormesswerte bei Kuppelprozess mit RK900; Distanzmessung der 1D- Laserdistanzsensoren links/rechts (oben); Beschleunigungsmessung in Fahrtrichtung mittels IMU (unten).....	15
Abbildung 6 Sensormesswerte bei Kuppelprozess mit DAK; (oben) DAK-Versuchsaufbau; (unten) Beschleunigungsmessung in Fahrtrichtung mittels IMU	16
Abbildung 7: RGB-Bild (links oben); Machine Learning Output (rechts oben); Extrahierte Gleis- und Streckenpunkte (links unten); Interpolierte mögliche Streckenverläufe (rechts unten)...	17
Abbildung 8: Nachtaufnahme des Gleisverlaufs (oben); Resultat des Machine Learning (unten)	18
Abbildung 9: Gleisdetektion Machine Learning Output. Weichenzunge wird erst auf kürzere Distanz klar erkennbar	19
Abbildung 10 Visuelle Erkennung von Form- und Lichtsignalen	20
Abbildung 11: Detektion von Weichenmarkern.....	21
Abbildung 12 Systemübersicht für Fusion von autoSHUNTING mit Greenlight.	23