



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Verkehr BAV**  
Förderprogramm für Innovationen im regionalen Personenverkehr (RPV)

# **ZEUS – Zürich Experiment für Umfassende Sicherheit**

**Leben retten und Unfälle vermeiden mithilfe modernster Fahrerassistenzsysteme und Airbags auf Trams**

Schlussbericht

**Ammandip Duggal, ALSTOM Schweiz AG**

Brown-Boveri-Strasse 5, 8050 Zürich, ammandip.duggal@alstomgroup.com, www.alstom.com

**Silvio Hochreutener, Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich VBZ**

Luggwegstrasse 65, 8048 Zürich, silvio.hochreutener@vbz.ch, www.vbz.ch

## **Begleitgruppe**

-

## **Impressum**

Herausgeberin:  
Bundesamt für Verkehr BAV  
Förderprogramm für Innovationen im regionalen Personenverkehr (RPV)  
CH-3003 Bern

Programmleiter  
Christophe Le Borgne, BAV

Projektnummer: 3002  
Bezugsquelle  
Kostenlos zu beziehen über das Internet  
[www.bav.admin.ch/innovation-rpv](http://www.bav.admin.ch/innovation-rpv)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor oder sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 19.08.2024

## Inhaltverzeichnis

Executive Summary in Deutsch .....	2
Résumé exécutif en français .....	3
Executive Summary in English.....	4
Zusammenfassung in Deutsch.....	5
Résumé en français .....	9
1. Ausgangslage .....	13
2. Ziel der Arbeit .....	16
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand .....	18
4. Ergebnisse .....	20
5. Diskussion .....	24
6. Kosten-Nutzen-Analyse .....	26
7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	27
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis .....	27
Literaturverzeichnis .....	28
Anhang .....	28

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Hauptwörtern in diesem Bericht die männliche Form verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.

## Executive Summary in Deutsch

Gemäss der Schadensstatistik der Jahre 2018-2023 ereignen sich bei den Verkehrsbetrieben der Stadt Zürich (VBZ) durchschnittlich rund 1550 Schadensereignisse pro Jahr. Etwa 1000 Schadensereignisse stehen dabei im Zusammenhang mit Trams. Hiervon enden durchschnittlich 280 Unfälle mit Körperverletzungen und drei mit Todesfällen.

Die Mehrheit der Unfälle mit Todesfolge ereignete sich aufgrund von Frontalkollisionen mit Fussgängern sowie Velofahrern. Die VBZ wollen diese tödlichen Unfälle sowie jene mit Verletzungsfolgen reduzieren und die Sicherheit im Strassen- und Tramverkehr entsprechend erhöhen.

Das Projekt ZEUS (Zürich Experiment für Umfassende Sicherheit) verfolgt diesbezüglich einen innovativen und mehrstufigen Ansatz und soll die Anzahl und den Schweregrad von Unfällen mit Hilfe von modernster Technologie spürbar reduzieren. Das Umgebungserkennungssystem nutzt modernste Sensortechnik, Computervision-Algorithmen und ein neuronales Netzwerk (künstliche Intelligenz), um Objekte zu identifizieren und zu klassifizieren sowie um die streckenseitigen Signale zu erkennen. Es erkennt so gefährliche Situationen, die zu einer Kollision führen können. Das Fahrerassistenzsystem warnt in einem ersten Schritt den Fahrer und – sollte dieser nicht auf die Warnung reagieren – leitet in einem zweiten Schritt automatisch einen Bremsvorgang ein. So wird in erster Linie das Eintrittsrisiko eines Unfalls verringert. Sollte trotz der eingeleiteten Massnahmen eine Kollision unvermeidbar sein, wird noch vor der Kollision der Frontal-Airbag ausgelöst. Dieser reduziert den Primäranprall an der Fahrzeugfront und reduziert dadurch den Schweregrad der Verletzungen. Gleichzeitig verhindert ein zweiter, kleinerer Airbag, dass die Person unter das Tram geraten kann.

Die Projektergebnisse haben die Machbarkeit der zu Beginn des Projektes gesetzten Ziele gezeigt. Besonders in Bezug auf den Airbag konnten grosse Fortschritte erzielt werden. Für die Objekt- und Signalerkennung fehlt für gewisse Objektklassen noch die benötigte Robustheit und Präzision. Das Projekt hat dafür klar aufgezeigt, wo Optimierungspotenzial vorhanden ist. Mit Hilfe dieses Projektes wurden die Grundlagen für die Weiterentwicklung eines KI-basierten Fahrerassistenzsystems inklusive eines aktiven Passantenschutzes erarbeitet. Wir sind überzeugt, dass mit den gewonnenen Erkenntnissen und den weiteren Entwicklungen in Zukunft die Anzahl und der Schweregrad von Unfällen reduziert und dadurch kostbare Menschenleben gerettet werden können. Deshalb soll mit weiteren, nahtlos anschließenden Entwicklungsprojekten intensiv an der schrittweisen Serialisierung eines solchen Produktes gearbeitet werden.

Ein in Umlauf gebrachtes Privatvideo der Schlusspräsentation führte zu einem unerwarteten Ausmass an internationaler Aufmerksamkeit und medialer Resonanz. Etliche Anfragen von verschiedenen Newsportalen und Medien, sowie Beiträge auf vielen Social Media Plattformen, mit zum Teil mehreren Millionen Views, zeigten deutlich das Interesse der Gesellschaft an diesem Novum eines Passanten-Airbags für Trams auf.



Abbildung 1 Gruppenbild vor Testtram anlässlich der BAV-Präsentation am 16.04.2024

## Résumé exécutif en français

Selon les statistiques des années 2018 à 2023, environ 1550 sinistres surviennent en moyenne chaque année chez les VBZ (Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich - Services de transport de Zürich). Environ 1000 de ces événements sont en lien avec les tramways. Parmi ceux-ci, une moyenne de 280 entraînent des blessures et 3 causent un décès.

La majorité des accidents entraînant la mort surviennent suite à une collision frontale avec des piétons ou des cyclistes. Les VBZ souhaitent réduire le nombre d'accidents mortels, ainsi que les accidents donnant lieu à des blessures, et ainsi améliorer la sécurité du système de transport dans son ensemble.

Le Projet ZEUS (Zürich Experiment für Umfassende Sicherheit – Zürich Expérience pour la sécurité intégrale) adopte à cet égard une approche innovante et en plusieurs étapes et devrait réduire sensiblement le nombre et la gravité des accidents à l'aide des diverses technologies de pointe. Le système de reconnaissance de l'environnement utilise les technologies de capteurs les plus récentes, des algorithmes classiques de traitement des images et un réseau neuronal (intelligence artificielle). Ceux-ci permettent d'identifier et classer les objets (piétons, cyclistes, voitures...) ainsi que reconnaître les signaux de voie. Le système identifie ainsi les situations potentiellement dangereuses, qui peuvent mener à une collision. Dans un premier temps, le «système d'assistance à la conduite» avertit le conducteur et dans un second temps – si celui-ci ne réagit pas à l'avertissement – les freins sont appliqués automatiquement. De cette manière, c'est en premier lieu le risque d'occurrence de l'accident qui est réduit. Si, malgré les mesures mises en place, la collision est jugée inévitable, une combinaison de coussins gonflables est activée dans les instants précédents la collision. Ces coussins réduisent l'impact principal à l'avant du véhicule et permettent de réduire la sévérité des blessures. Dans un même temps, les coussins permettent d'éviter que la personne ne passe sous le tram.

Les résultats du projet ont démontré la faisabilité des objectifs fixés au début du projet. De grands progrès ont été réalisés, en particulier en ce qui concerne les coussins gonflables. En ce qui concerne le système de reconnaissance d'objets et de signaux, la robustesse et la précision doivent être améliorées pour l'identification de certaines classes d'objets. Le projet a à cet effet clairement montré les zones d'optimisations potentielles. Ce projet a permis d'élaborer les bases pour le développement d'un système d'assistance à la conduite basé sur l'IA, y compris une protection active des passants. Nous sommes convaincus que les connaissances acquises et les développements futurs permettront à l'avenir de réduire le nombre et la gravité des accidents et de sauver ainsi de précieuses vies humaines. C'est pourquoi d'autres projets de développement doivent être menés de manière intensive afin de sérialiser progressivement un tel produit.

La diffusion d'une vidéo privée de la présentation finale a suscité une attention internationale et un écho médiatique inattendus. De nombreuses demandes de différents portails d'information et médias, ainsi que des contributions sur de nombreuses plates-formes de médias sociaux, avec parfois plusieurs millions de vues, ont clairement montré l'intérêt de la société pour cette nouveauté qu'est l'airbag pour piétons dans les trams.

## Executive Summary in English

According to accident statistics from 2018 to 2023, VBZ (Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich – Public Transport Operator of Zurich) experiences an average of 1,550 accidents annually, around 1,000 involving trams. On average, 280 of these result in physical injuries, and 3 are fatal.

Most fatal accidents are due to frontal collisions with pedestrians and cyclists. VBZ aims to reduce these fatal and injury-causing accidents to enhance the overall safety of the transportation system.

In this regard, the ZEUS project (Zurich Experiment for Comprehensive Safety) is pursuing an innovative multistep approach intended to significantly reduce both the number and the severity of accidents using advanced technology. In the first step, the environment recognition system uses the latest sensor technology, computer vision algorithms and machine learning techniques to identify and classify objects and to recognize trackside signals. By doing so, it detects dangerous situations before they lead to collisions. This driver assistant system first warns the driver and second, if the driver does not react to the warning, automatically initiates braking. This reduces the risk of an accident occurring. As a second step, if a collision is unavoidable despite these measures taken, the airbag system will be triggered before the collision. The airbag reduces the primary impact on the front of the vehicle and thereby reduces the severity of the injuries. At the same time, the second airbag prevents the person from getting trapped under the tram.

The project results have demonstrated the feasibility of the goals set at the beginning of the project. Significant progress has been made, particularly with the airbags. While the object and signal recognition system shows promising results, it currently lacks the necessary robustness and precision for certain object types. However, the project has highlighted potential areas for optimization. With the help of this project, the foundations were laid for the further development of an AI-based driver assistance system including active pedestrian protection. This makes us optimistic that the knowledge gained, and further developments will help reduce the number and severity of accidents in the future, ultimately saving lives. For this reason, we are working intensively on the gradual serialisation of such a product in further, seamlessly connected development projects.

A circulated private video of the final presentation led to an unexpected level of international attention and media resonance. Numerous enquiries from various news portals and media, as well as posts on many social media platforms, some with several million views, clearly demonstrated society's interest in this novelty of a pedestrian airbag for trams.

## Zusammenfassung in Deutsch

### Ausgangslage

Die Fahrzeuge der Verkehrsbetriebe Zürich, dem Betriebspartner in diesem Projekt, bewegen sich täglich in einem äusserst anspruchsvollen Umfeld in der Stadt Zürich. Eine zunehmende Anzahl von Verkehrsteilnehmern und neue Arten von Verkehrsmittel führen zu zusätzlichen Herausforderungen für einen störungsfreien und reibungslosen Betrieb. Unfälle mit Trams und Bussen, anderen Strassenfahrzeugen und Personen sind an der Tagesordnung. Gemäss Unfallstatistik des VBZ-Schadensdienstes kommt es im Schnitt jedes Jahr zu 1'000 Schadensfällen im Zusammenhang mit Trams (Betrachtungszeitraum 2011-2023, ohne die Covid-Jahre 2020 & 2021). Davon sind im Schnitt rund 500 Schadensfälle «Kollisionen mit Fahrzeugen» und 280 Schadensfälle «Unfälle mit Körperverletzung». Über die letzten 6 Jahre gesehen, sterben dabei durchschnittlich 2,5 Personen im Jahr. Demzufolge verliert jede zehnte Person aller Verkehrstoten im öffentlichen Verkehr der Schweiz (Suizide ausgenommen) ihr Leben aufgrund eines Tramunfalls in der Stadt Zürich. Die Mehrheit der Unfälle mit Todesfolge ereignen sich aufgrund von Frontalkollisionen mit Fussgängern sowie Velofahrern.



Abbildung 2 Statistik der VBZ bezüglich Unfälle mit tödlichem Ausgang [3]

### Ziel und innovativer Ansatz

Das ZEUS-Projekt verfolgte das Ziel, Leben zu retten und die Sicherheit im Strassen- und Tramverkehr zu erhöhen. Dies soll über die Verfolgung eines innovativen Ansatzes erreicht werden, damit die Anzahl und der Schweregrad von Unfällen mit Hilfe von modernster Technologie spürbar reduziert wird.

Für die Reduktion der Anzahl von Unfällen kommt in diesem Projekt ein ausgeklügeltes Umgebungserkennungssystem zum Einsatz. Dieses macht sich modernste Sensortechnik, Computervisionen-Algorithmen und ein neuronales Netzwerk (Künstliche Intelligenz) zu Nutze, um Objekte zu identifizieren und zu klassifizieren, sowie streckenseitige Signale zu erkennen. Das System erkennt gefährliche Situationen, die zu einem Unfall führen können – etwa das Übersehen von Objekten innerhalb des Fahrwegs, das Überfahren eines «Halt» zeigenden Signals oder das Überschreiten von vorgegebenen Geschwindigkeitslimiten. In einem ersten Schritt warnt das System den Fahrer und leitet in einem zweiten Schritt, bei ausbleibender Reaktion des Fahrers, einen Bremsvorgang ein.

Das Fahrerassistenzsystem zur Verringerung des Eintrittsrisikos eines Unfalles wird ergänzt durch das Frontal-Airbag-System. Sollte trotz der eingeleiteten Massnahmen eine Kollision unvermeidbar sein, werden noch vor der Kollision zwei Airbags ausgelöst. Diese Airbags reduzieren die Wucht des Primäranpralls der Person an der Fahrzeugfront und verringern dadurch den Schweregrad der Verletzungen. Gleichzeitig verhindern sie, dass die Person unter das Tram geraten kann.

## Vorgehensweise in der Übersicht

Als Versuchsträger für das ZEUS-Projekt wurde das Flexity-Tram 4001 der VBZ auserkoren. Hergestellt wurden die Fahrzeuge vom Schienenfahrzeughersteller ALSTOM. Die Fahrzeuge sind bereits mit dem firmeneigenen Kollisionswarnsystem ODAS ausgerüstet, dessen Hardware als Grundlage für die Weiterentwicklung des Fahrerassistenzsystems und das Frontal-Airbag-System verwendet wurde. Abbildung 3 zeigt den ZEUS-Prototypen bei Testfahrten auf dem Bremsprüfgleis der Zentralwerkstatt der VBZ.



Abbildung 3 Flexity 4001 ZEUS – Prototyp in der Zentralwerkstatt der VBZ

Das Projekt startete im Dezember 2021 und fand seinen Abschluss im April 2024 mit der finalen Präsentation der Entwicklungsergebnisse. Insgesamt kann das Projekt in vier Hauptphasen unterteilt werden.

1. In der **Konzeptphase** wurden die Architektur, die notwendigen Schnittstellen und die Anwendungsfälle für die Subsysteme Fahrerassistenzsystem und Frontal-Airbag definiert. Während dieser Phase wurde auch die Anzahl und die Art der benötigten Sensoren festgelegt.
2. Zu Beginn der **Entwicklungsphase** wurde auf dem Tram ein Datenrekorder installiert, um möglichst früh mit der benötigten Datenerhebung im fortwährenden Passagierbetrieb zu starten. Nach dem Vorliegen der ersten aufgenommenen Daten wurden die Bilder analysiert und darauf zu erkennende Objekte, als Vorbereitung für das Training der künstlichen Intelligenz, klassifiziert. Zeitgleich starteten die Aktivitäten für die Anpassung der PERCEPT Plattform für den Anwendungsfall Tram. Zudem wurde mit dem Prototyping und ersten statischen Tests mit dem Frontal-Airbag begonnen. Gegen Ende der Entwicklungsphase konnten bereits erste Auslöseversuche des Airbags auf dem Tram vorgenommen werden.
3. Nach Abschluss der Entwicklungsphase wurde der Datenrekorder aus dem Fahrzeug entfernt und die final benötigte Hardware verbaut. Während der **Implementierungsphase** wurde die künstliche Intelligenz mit zusätzlichen Trainingsbildern stetig verbessert und die neuen Funktionalitäten für die Signal- und Kollisionserkennung getestet. Mit Hilfe etlicher Entwicklungszyklen wurde das Airbagdesign und die Airbagauslösung sukzessive weiterentwickelt, wobei die Zeit zwischen den Depottests für die Analyse der Ergebnisse und das Einarbeiten der Verbesserungen verwendet wurde.
4. Die letzte Phase im Projekt, die **Optimierungsphase**, wurde dafür genutzt, die Robustheit der künstlichen Intelligenz weiter zu steigern. Mit Hilfe weiterer Annotationszyklen und fortwährendem Training wurde die Erkennungsgenauigkeit für die verschiedenen Objektklassen verbessert.

Nach über 100 Airbag-Entfaltungstests und mehr als 25 realistischen Airbag-Kollisionstests konnte am Ende der Optimierungsphase im April 2024 der ZEUS-Prototyp Vertretern des BAV und anderen Trambetreibern erfolgreich vorgestellt werden.

In insgesamt acht mehrtägigen Testsessionen wurde das System zuvor im Depot auf Herz und Nieren überprüft. In der Zeit zwischen den Depottests verkehrte der ZEUS-Prototyp im Regelbetrieb mit Passagieren. Diese Phasen wurden zunächst für die Datenerhebung und dann für die Analyse des Verhaltens des Systems in realen Situationen genutzt. Seit Juli 2023 liefen das Objekterkennungssystem und das für die Auslösung des Airbags verantwortliche System passiv mit. Während dieser passiven Phase war kein Airbag verbaut. Zudem wurden jegliche Warnungen und Bremsanforderungen unterdrückt, um einen reibungslosen und störungsfreien Passagierbetrieb zu gewährleisten.



Abbildung 4 *Flexity 4001 ZEUS – Prototyp während Kollisionsvermeidungstests*

### **Projektergebnisse**

Innerhalb des ZEUS-Projektes konnte gezeigt werden, dass es mit Hilfe des eingesetzten Systems möglich sein sollte, Leben zu retten. Die Machbarkeit aller gesetzten Projektziele wurde mehrfach bewiesen. Für gewisse Teilbereiche gibt es noch Verbesserungspotenzial und auch Entwicklungsnotwendigkeiten, damit ein allfälliges Serienprodukt hergestellt werden kann.

Es konnte gezeigt werden, dass vor Kollisionen mit Betriebsgeschwindigkeiten gewarnt wird und das Fahrzeug entsprechend eingebremst werden kann. Zu verbessern ist diesbezüglich die Erkennungsgenauigkeit der Fahrstrasse. Für die Geschwindigkeitsüberwachung mittels Signalerkennung wurde aufgezeigt, dass Schilder erkannt und der Situation angepasste Massnahmen eingeleitet werden können. Allerdings müssen für das vollumfängliche Erkennen von Geschwindigkeitslimiten weitere Signaltafeln antrainiert und die Robustheit der bestehenden Erkennung gesteigert werden.

Dasselbe gilt für die Überwachung der Einhaltung von Fahrsignalen anhand von Punktsignalen und Weichenstellungsmeldern. Die Zuordnung der Signale zum Fahrweg (schwarzer Richtungspfeil unterhalb des Signales) oder zu den verschiedenen Verkehrsträgern (Text «TRAM» / «BUS») ist noch nicht implementiert.

Für die verschiedenen Objektklassen konnte eine gute Klassifizierung erreicht werden. Seltene Objekte wurden aufgrund weniger vorhandenen Trainingsdaten noch nicht ausreichend trainiert und damit nicht erkannt. Die Robustheit der Erkennung des Kollisionsrisikos im Nahbereich konnte im Vergleich zu ODAS erfolgreich erhöht werden.

Die Kollisionsversuche mit dem Frontal-Airbag haben gezeigt, dass ein Passantenschutz mit einem Airbag möglich ist. Innerhalb des Projektzeitraums wurde ein Airbag entwickelt, welcher in der Lage ist, einen allfälligen Aufprall entsprechend zu mindern, das Leben einer Person zu retten, sowie den Schweregrad der Verletzungen zu reduzieren.

## **Ausblick**

Im Rahmen des ZEUS-Projektes konnten die Grundlagen für die nächste Generation von Fahrerassistenzsystemen, welche sich künstliche Intelligenz zunutze machen, sowie dem Passantenschutz mit Hilfe eines proaktiv gezündeten Airbags erarbeitet werden.

In einem nächsten Schritt muss das System für einen aktiven Betrieb in einer Fahrzeugflotte im Passagierbetrieb optimiert werden. Dies beinhaltet Kostenoptimierungen, beispielsweise durch die Reduktion von Hardwarekomponenten, technische Optimierungen – wie die Verkürzung der Entfaltungszeit des Airbags – sowie Optimierungen im Hinblick auf den Betrieb, sprich vereinfachter Wiederinbetriebsetzung des Fahrzeuges nach einer erfolgten Airbag-Auslösung. Dafür sind bereits mehrere sukzessiv folgende Entwicklungs- und Validierungsphasen auf verschiedenen Prototypenfahrzeugen geplant, mit dem Endziel ein produktreifes Serienprodukt bereitzustellen.

## Résumé en français

### Situation initiale

Les véhicules des transports publics de Zurich, le partenaire d'exploitation dans ce projet, évoluent quotidiennement dans un environnement extrêmement exigeant dans la ville de Zurich. L'augmentation du nombre d'usagers de la route et l'apparition de nouveaux types de moyens de transport constituent un défi supplémentaire pour une exploitation sans faille et sans incident. Les accidents avec les trams et les bus, les autres véhicules routiers et les personnes sont monnaie courante. Selon les statistiques d'accidents du service des sinistres VBZ, on dénombre en moyenne 1000 sinistres par an liés aux trams (période d'observation 2011-2023, sans les années Covid 2020 & 2021). Parmi ceux-ci, 500 sont des collisions avec des véhicules et 280 des accidents avec blessures corporelles. Au cours des 6 dernières années, 2,5 personnes en moyenne sont mortes chaque année. Par conséquent, une personne sur dix parmi toutes les personnes décédées dans les transports publics en Suisse (suicides exclus) perd la vie à cause d'un accident de tramway dans la ville de Zurich. La majorité des accidents mortels sont dus à des collisions frontales avec des piétons ou des cyclistes.



Abbildung 5 Statistiken des VBZ concernant les accidents mortels [3]

### Objectif et approche innovante

Le projet ZEUS s'est fixé comme objectif de sauver des vies et d'améliorer la sécurité de la circulation routière et des trams. Pour y parvenir, il faut adopter une approche innovante qui permette de réduire sensiblement le nombre et la gravité des accidents grâce à une technologie de pointe.

Afin de réduire le nombre d'accidents, ce projet fait appel à un système sophistiqué de reconnaissance de l'environnement. Celui-ci utilise une série de capteurs ultramodernes, des algorithmes de vision par ordinateur et un réseau neuronal (intelligence artificielle) pour identifier et classer les objets, ainsi que pour reconnaître les signaux de voie. Il détecte ainsi les situations dangereuses qui peuvent mener à un accident, telles que, le fait de ne pas voir un objet sur la voie, le franchissement d'un signal "arrêt" ou le dépassement des limites de vitesse fixées. Suite à la détection d'une situation potentiellement dangereuse, le système avertit dans un premier temps le conducteur et dans un deuxième temps, en l'absence de réaction du conducteur, il déclenche un processus de freinage.

Le système d'assistance à la conduite visant à réduire le risque d'accident est complété par le système «Airbag Frontal». Si, malgré les mesures engagées, une collision est inévitable, deux coussins gonflables se déploient dans l'instant précédent la collision. Ces coussins réduisent la force de l'impact primaire de la personne contre l'avant du véhicule et diminuent ainsi la gravité des blessures. De plus, ils empêchent la personne de passer sous le tram.

## Aperçu de la procédure

Le tramway Flexity 4001 des VBZ a été choisi comme support d'essai pour le projet ZEUS. Les véhicules Flexity ont été fabriqués par le constructeur de véhicules ferroviaires ALSTOM. Les véhicules sont déjà équipés du système d'alerte de collision ODAS de l'entreprise, qui a servi de base et auquel s'est ajouté le système «Airbag Frontal». L'illustration 6 montre le prototype ZEUS dans le dépôt central de VBZ.



Abbildung 6 Flexity 4001 ZEUS – prototype dans le dépôt de véhicules central de VBZ

Le projet a débuté en décembre 2021 et s'est achevé en avril 2024 avec la présentation finale des résultats du développement. Au total, le projet a été divisé en quatre phases principales.

1. La **phase conceptuelle** a permis de définir l'architecture, les interfaces nécessaires et les cas d'utilisation des sous-systèmes «système d'assistance à la conduite» et «Airbag Frontal». Le nombre et le type de capteurs nécessaires ont également été déterminés au cours de cette phase.
2. Au début de la **phase de développement**, un enregistreur de données a été installé sur le tramway afin d'amorcer le plus tôt possible la collecte des données nécessaires dans le cadre du service continu de transport des passagers. Une fois les premières données enregistrées, les images ont été analysées et les objets à reconnaître ont été classés, en préparation à l'entraînement de l'intelligence artificielle. Parallèlement, les activités d'adaptation de la plateforme PERCEPT pour le cas d'application du tramway ont démarré. En outre, le prototypage et les premiers tests statiques avec l'airbag ont commencé. Vers la fin de la phase de développement, les premiers essais de déclenchement de l'airbag sur le tram ont déjà pu être effectués.
3. Une fois la phase de développement terminée, l'enregistreur de données a été retiré du véhicule et le matériel final nécessaire a été installé. Pendant la **phase de mise en œuvre**, l'intelligence artificielle a été constamment améliorée grâce à des images d'entraînement supplémentaires et les nouvelles fonctionnalités de détection de signaux et de collisions ont été testées. Le design et le déclenchement des airbags ont été développés itérativement au cours de plusieurs cycles de développement, le temps entre les tests au dépôt étant consacré à l'analyse des résultats et à l'intégration des améliorations.
4. La dernière phase du projet, la **phase d'optimisation**, a été utilisée pour améliorer encore la robustesse de l'intelligence artificielle. Des cycles d'annotation supplémentaires et un entraînement plus poussé ont permis d'améliorer la précision de la reconnaissance pour les différentes classes d'objets.

Après plus de 100 tests de déploiement d'airbags et plus de 25 tests de collision réalistes, le prototype ZEUS a pu être présenté avec succès à des représentants de l'Office fédéral des transports (OFT) et à des représentants d'autres exploitants de tramways à la fin de la phase d'optimisation en avril 2024.

Auparavant, le système avait été testé sous toutes les coutures au cours de huit sessions d'essais de plusieurs jours dans le dépôt. Entre les tests au dépôt, le prototype ZEUS a circulé en service régulier avec des passagers. Ces phases ont d'abord été utilisées pour la collecte de données, puis pour l'analyse du comportement du système dans des situations réelles. Depuis juillet 2023, le système de reconnaissance d'objets et le système responsable du déclenchement de l'airbag ont fonctionné de manière passive. Pendant cette phase passive, aucun airbag n'était installé. De plus, toutes les alertes et demandes de freinage ont été supprimées afin d'éviter des interruptions de service inopinées.

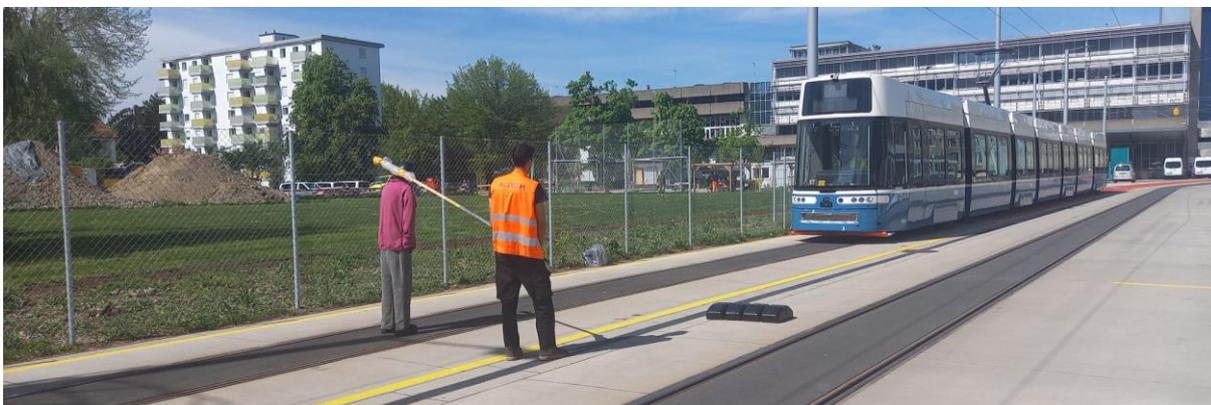


Abbildung 7 Flexity 4001 ZEUS - prototype pendant les tests d'évitement de collision

### Résultats du projet

Le projet ZEUS a démontré qu'il était possible de sauver des vies à l'aide du système mis en place. La faisabilité de tous les objectifs du projet a été prouvée à plusieurs reprises. Toutefois, il existe encore un potentiel d'amélioration et certains développements sont nécessaires avant de lancer une éventuelle production de série.

Il a été démontré qu'en vitesse de service, un avertissement a lieu avant une collision et que le véhicule peut être freiné en conséquence. La précision de la reconnaissance de la route doit être améliorée à cet égard. En ce qui concerne la surveillance de la vitesse au moyen de la reconnaissance des signaux, il a été démontré que les panneaux pouvaient être reconnus et que des mesures adaptées à la situation pouvaient être prises. Toutefois, pour une reconnaissance complète des limites de vitesse, il faut inclure l'apprentissage de panneaux de signalisation additionnels et améliorer la robustesse de la reconnaissance existante.

Il en va de même pour la surveillance du respect des signaux de circulation à l'aide de signaux ponctuels et de détecteurs de position d'aiguillage. L'affectation des signaux à la voie de circulation (flèche directionnelle noir sous le signal) ou aux différents modes de transport (texte "TRAM" / "BUS") n'est pas encore implémentée.

Une bonne classification a pu être obtenue pour les différentes classes d'objets. Les objets rares n'ont pas encore été suffisamment entraînés en raison du peu de données d'entraînement disponibles et ont pu être reconnus correctement moins souvent. La robustesse de la détection du risque de collision dans la zone proche a pu être augmentée avec succès par rapport à ODAS.

Les essais de collision avec l'airbag ont montré qu'il était possible de protéger les passagers avec un airbag. Pendant la durée du projet, un airbag a été développé, qui est en mesure d'atténuer une éventuelle collision, de sauver la vie d'une personne et de réduire la gravité des blessures.

## **Perspectives**

Le projet ZEUS a permis d'élaborer les bases de la prochaine génération de systèmes d'assistance à la conduite, qui utilisent l'intelligence artificielle, ainsi que la protection des passants à l'aide d'un airbag déclenché de manière proactive.

Dans une prochaine étape, le système doit être optimisé pour une utilisation active dans une flotte de véhicules en service pour le transport de passagers. Cela comprend des améliorations du système de reconnaissance des objets, des optimisations de coûts, par exemple en réduisant les composants matériels utilisés, des optimisations techniques, comme la réduction du temps de déploiement de l'airbag, ainsi que des optimisations en termes d'exploitation, c'est-à-dire une remise en service simplifiée du véhicule suite à un déclenchement de l'airbag. Pour cela, plusieurs phases successives de développement et de validation sont déjà prévues sur différents véhicules prototypes, l'objectif final étant de mettre à disposition un produit de série prêt à être commercialisé.

## 1. Ausgangslage

Das Bewegen im Strassenverkehr, besonders in den Städten, ist sehr herausfordernd und hat deutlich an Komplexität gewonnen. Schon allein die Anzahl der Verkehrsteilnehmer stellt die Betreiber des öffentlichen Verkehrs vor grosse Herausforderungen einen unfallfreien Betrieb zu gewährleisten. Hinzu kommen neue Fortbewegungsmittel des Individualverkehrs, wie beispielsweise E-Scooter, die zusätzliche Schwierigkeiten mit sich bringen. Trotz der vorherrschenden Trends ist glücklicherweise keine Steigerung in der Anzahl der Unfälle ersichtlich, dennoch bewegen sich die Unfallzahlen auf relativ hohem Niveau. Um zukünftig die Fahrer bei der Ausführung ihrer anspruchsvollen Arbeit zu unterstützen und gleichzeitig die Anzahl und den Schweregrad von Unfällen mit ihren Trams zu reduzieren, haben die Verkehrsbetriebe Zürich zusammen mit dem Schienenfahrzeughersteller ALSTOM das Projekt ZEUS durchgeführt.

Ein Blick auf die Unfallstatistiken zeigen die Dringlichkeit und Notwendigkeit solcher Massnahmen. Bevor auf die spezifischen Unfallzahlen der VBZ eingegangen wird, soll die nationale Situation betrachtet werden.

Gemäss dem Sicherheitsbericht des BAV's von 2022 sterben im Schnitt 4.2 Personen pro Jahr im Zusammenhang von Unfällen mit Trams. Dazu kommen 31.8 schwerverletzte Personen pro Jahr. Weitere Details sind in Abbildung 8 zu finden.

**Unfälle, Getötete und Schwerverletzte im öffentlichen Verkehr 2018 – 2022 nach Verkehrsart**

Verkehrsart	Unfälle					Getötete					Schwerverletzte				
	2018	2019	2020	2021	2022	2018	2019	2020	2021	2022	2018	2019	2020	2021	2022
Eisenbahn	71	66	62	87	76	15	19	17	8	21	25	26	22	47	36
Zahnradbahn	2	0	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Strassenbahn	37	71	40	38	34	7	3	3	4	4	29	64	35	31	30
Auto- und Trolleybus	66	75	68	49	70	5	4	7	0	6	63	70	58	47	61
Standseilbahn	1	2	1	2	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Luftseilbahn	5	6	9	10	10	0	1	1	3	1	5	8	9	6	7
Schifffahrt	1	3	1	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
<b>Alle Verkehrsarten</b>	<b>183</b>	<b>223</b>	<b>182</b>	<b>190</b>	<b>194</b>	<b>28</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>16</b>	<b>33</b>	<b>123</b>	<b>169</b>	<b>125</b>	<b>133</b>	<b>135</b>

Abbildung 8 *Unfälle, Getötete und Schwerverletzte im öffentlichen Verkehr 2018 – 2022 nach Verkehrsart [1]*

Abbildung 9 zeigt die Aufschlüsselung der Unfallarten für den Tramverkehr. Durch Zusammenstösse mit Strassenfahrzeugen wurden über die letzten 5 Jahre im Schnitt 11.4 Personen schwer verletzt und 1 Person getötet. Durch An- und Überfahren wurden insgesamt 6.8 Personen schwer verletzt und 3 Personen getötet.

**Unfälle, Getötete und Schwerverletzte im Strassenbahnverkehr 2018 – 2022 nach Unfallart**

Unfallart	Unfälle					Getötete					Schwerverletzte				
	2018	2019	2020	2021	2022	2018	2019	2020	2021	2022	2018	2019	2020	2021	2022
Zusammenstösse mit Strassenfahrzeugen	9	18	20	16	5	3	1	1	0	0	6	14	18	14	5
Zusammenstösse mit Schienenfahrzeugen	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Personenunfälle durch An- und Überfahren	10	17	5	9	7	4	2	2	4	3	6	15	3	5	5
Personenunfälle wegen Fehllandung Chauffeur / technischer Defekt	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Personenunfälle im Fahrzeug wegen Fehllandung Dritte	6	12	7	4	4	0	0	0	0	0	6	13	7	4	4
Personenunfälle im Fahrzeug wegen Fehllandung Reisende	4	9	3	5	10	0	0	0	0	1	4	9	3	5	9
Personenunfälle beim Ein- und Aussteigen	5	12	3	3	5	0	0	0	0	0	5	12	3	3	5
Übrige Personenunfälle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Übrige Unfälle	2	2	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1
<b>Alle Unfallarten</b>	<b>37</b>	<b>71</b>	<b>40</b>	<b>38</b>	<b>34</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>29</b>	<b>64</b>	<b>35</b>	<b>31</b>	<b>30</b>

Abbildung 9 *Unfälle, Getötete und Schwerverletzte im Tramverkehr 2018 – 2022 nach Unfallart [1]*

Abgesehen von den finanziellen Schäden die Unfälle mit getöteten oder schwerverletzten Personen nach sich ziehen, hat ein solches Ereignis für die direkt betroffene Person und deren Umfeld einschneidende und gravierende Folgen. Zudem hat ein solcher Vorfall weitreichende Folgekonsequenzen für das Fahrpersonal, den Betrieb und die Instandhaltung. Darum ist es nicht nur im Interesse der Betreiber, sondern auch der Allgemeinheit die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Schwere eines solchen Ereignisses möglichst zu minimieren und zu entschärfen.

Nach dem Blick auf die nationale Situation richtet sich nun der Fokus auf die Schadensfälle des am Projekt mitbeteiligten Betreibers, der VBZ. Die Abbildung 10 zeigt die Anzahl der Schadensfälle mit den Trams der Verkehrsbetriebe Zürich über die Jahre von 2011 bis 2023. Die Covid-Pandemie-Jahre 2020 und 2021 wurden aufgrund ihrer Besonderheit bezüglich Fahrgastaufkommen von der Statistik ausgeschlossen. Über das letzte Jahrzehnt ereigneten sich relativ konstant knapp 1000 Schadensfälle pro Jahr.

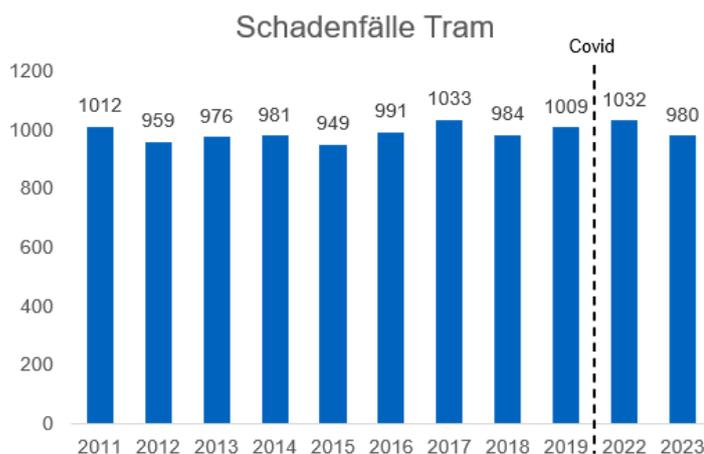


Abbildung 10 Anzahl Schadensfälle mit dem Tram pro Jahr bei der VBZ [2]

Die Aufschlüsselung der Schadensfälle zeigt auf, dass es durchschnittlich 280 Unfälle mit Körperverletzung und 500 Kollisionen mit Fahrzeugen pro Jahr gibt. Siehe dazu Abbildung 11 .

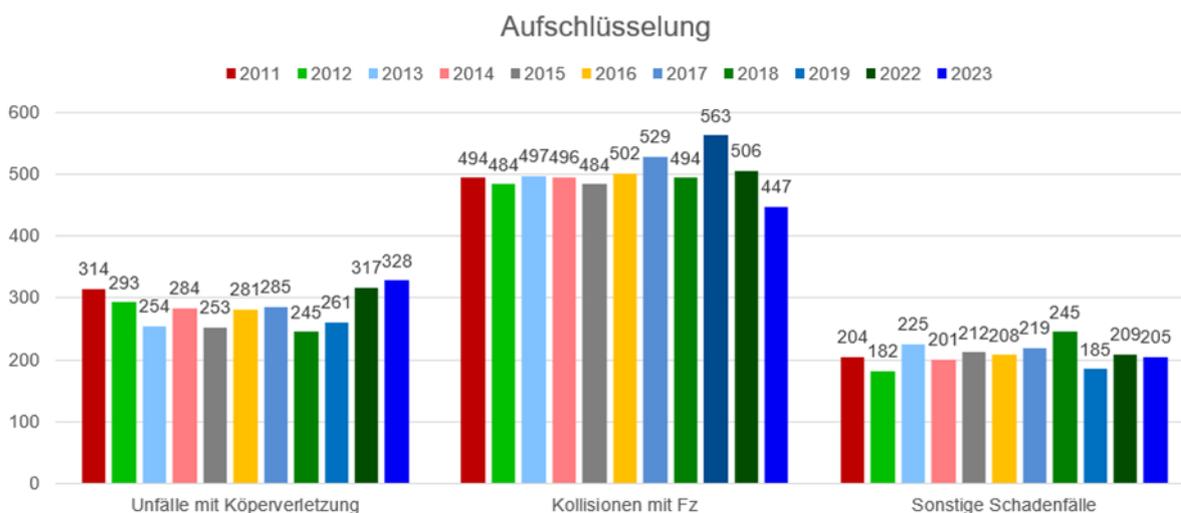


Abbildung 11 Aufschlüsselung der Tram-Schadensfälle bei der VBZ [2]

Die VBZ-Schadenstatistik (Abbildung 12 ) zeigt die Anzahl der Unfälle mit tödlichem Ausgang über die letzten 6 Jahre. Im Schnitt sind dies 2.5 Todesfälle pro Jahr. Wie der Schadenstatistik auch zu entnehmen ist, ereigneten sich alle Unfälle mit tödlichem Ausgang mit Trams. Dadurch lässt sich ein direkter Vergleich mit den nationalen Statistiken ziehen. Unter Berücksichtigung der Todesfälle durch Trams, stirbt mehr als jede zweite Person in Zürich, in Bezug auf alle Todesopfer im öffentlichen Verkehr (Suizide ausgeschlossen) ist es jede zehnte Person. Dementsprechend ist der Handlungsbedarf besonders in Zürich gegeben.



Abbildung 12 Statistik der VBZ bezüglich Unfälle mit tödlichem Ausgang [3]

## 2. Ziel der Arbeit

Ziel des ZEUS-Projekts ist es Leben zu retten. Durch einen ganzheitlichen Ansatz mittels modernster Sensortechnologie (Fahrerassistenzsystem) und einem innovativen Airbag (Frontal-Airbag), gelingt es die Sicherheit des Trambetriebs zu erhöhen. In erster Linie wird das Eintrittsrisiko eines Unfalles verringert. In zweiter Linie – falls die Kollision trotz aller Massnahmen nicht mehr vermeidbar ist – wird die Auswirkung, also der Schweregrad der Verletzungen, reduziert. Die beiden Bausteine, Fahrerassistenzsystem und Frontal-Airbag, sollen parallel entwickelt, getestet und danach für das Gesamtsystem zusammgeführt und als System im Verkehrsnetz der VBZ in einem Flexity-Tram erprobt werden.



Abbildung 13 Flexity 4001 ZEUS - Prototyp in der Zentralwerkstatt der VBZ

Das Fahrerassistenzsystem erkennt Hindernisse in Entfernungen bis zu 200 m und verhindert eine Kollision. Das System warnt den Fahrer über das bestehende Kollisionsrisiko. Reagiert der Fahrer nicht (z.B. durch Quittierung), triggert es die adäquate Massnahme (z.B. Bremsung). Zudem erkennt es die streckenseitige Fahrsignale (z.B. Weichenstellungsmelder, Stopplichtsignale (Punktsignale) oder Geschwindigkeitstafeln) und interpretiert diese korrekt und frühzeitig. Verhält sich der Fahrer nicht entsprechend, wird er gewarnt. Quittiert der Fahrer die Warnung nicht, wird automatisch die Geschwindigkeit reduziert. Das System ist in der Lage, die Art des Hindernisses zu erkennen und diese in 2 Kategorien (Mensch / Nicht Mensch) einzuordnen. Das Fahrerassistenzsystem ist in der Lage, das Vorhandensein von Hindernissen im Bereich von 0 bis 10 Metern vor der Tramvorderseite zu erkennen, die Kollisionszeit bis auf 0,5 Sekunden genau abzuschätzen und diese Informationen dem Frontal-Airbag-System zur Verfügung zu stellen. Der Prototyp ist in der Lage, einen grossen Frontal-Airbag innerhalb von 0,5 Sekunden vor einem Zusammenstoss mit einem Fahrradfahrer, einem stehenden Erwachsenen oder einem stehenden Kind zu entfalten. Damit soll die Wucht des Primärschocks verringert werden.

Insgesamt wurden 6 Projektziele definiert:

### **Projektziel 1 – Kollisionsvermeidung bei Betriebsgeschwindigkeit**

Das Fahrerassistenzsystem erkennt Hindernisse in Entfernungen bis zu 200 m und verhindert Kollisionen. Es warnt den Fahrer über das bestehende Kollisionsrisiko. Reagiert der Fahrer nicht (z.B. durch Quittierung), triggert es die adäquate Massnahme (z.B. Bremsung).

### **Projektziel 2 – Geschwindigkeitsüberwachung mit Signalerkennung**

Das Fahrerassistenzsystem erkennt die Geschwindigkeitssignale und interpretiert diese korrekt und frühzeitig. Verhält sich der Fahrer nicht entsprechend, wird er gewarnt. Quittiert der Fahrer die Warnung nicht, wird automatisch die Geschwindigkeit reduziert.

### **Projektziel 3 – Überwachung der Einhaltung von Fahrsignalen**

Das Fahrerassistenzsystem soll streckenseitige Fahrsignale erkennen und das Einhalten der Vorgaben überwachen. Reagiert der Fahrer auch nach einer Warnung nicht, wird die entsprechende Reaktion automatisch umgesetzt.

#### **Projektziel 4 – Klassifizierung von Objekten**

Das Fahrerassistenzsystem ist in der Lage, die Art des Hindernisses zu erkennen und diese in zwei Kategorien einzuordnen:

- Mensch = Fussgänger, Kinder, Radfahrer, Kinderwagen mit Kind
- Nicht-Mensch = z.B. Fahrzeug, Schranken, geschlossene Depoteinfahrten, usw.

#### **Projektziel 5 – Erkennung Kollisionsrisiko Nahbereich – Frontal-Airbag**

Das Fahrerassistenzsystem ist in der Lage, das Vorhandensein von Hindernissen im Bereich von 0 bis 10 Metern vor der Tramvorderseite zu erkennen, die Kollisionszeit bis auf 0,5 Sekunden genau abzuschätzen und diese Informationen dem Frontal-Airbag-System zur Verfügung zu stellen.

#### **Projektziel 6 – Effektive Entfaltung des Frontal-Airbags**

Der Prototyp des Frontal-Airbag-Systems ist in der Lage, einen grossen Airbag innerhalb von 0,5 Sekunden vor einem Zusammenstoss mit einem Menschen zu entfalten. Damit soll die Wucht des Primärschocks verringert werden.

### 3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Objekterkennungs- und Kollisionswarnsystem sind in der Automobilindustrie bereits weit verbreitet. Die Adaption der bestehenden Strassenfahrzeugsystem auf den Anwendungsfall für Schienenfahrzeuge gestaltet sich schwerer als auf den ersten Blick ersichtlich. Bahnspezifische Normen, abweichende Rahmenbedingungen und der vergleichsweise kleine Markt erschweren den Markteintritt und machen diesen unattraktiv. Deshalb arbeiten verschiedene Schienenfahrzeughersteller an hauseigenen Lösungen, um den vorhandenen Bedarf abzudecken.

Auch ALSTOM hat mehrere solche Kollisionswarnsysteme entwickelt. Für den LRV-Bereich existiert das bewährte und bei etlichen Betreibern verbaute ODAS-System. Mit Hilfe von Stereokameras werden auf Kollisionskurs befindliche Objekte im Fahrweg erkannt und der Fahrer rechtzeitig gewarnt. Bei ausbleibender Reaktion fordert das System eine Bremsung vom Fahrzeug an. Das skalierbare System kann mit einer Odometrie-Einheit ergänzt werden, sodass zusätzlich zur Kollisionsvermeidung eine Geschwindigkeitsüberwachung durch das System erfolgt (COMPAS). Des Weiteren existiert eine kostengünstige Version auf Basis der Odometrie-Einheit mit lediglich der Geschwindigkeitsüberwachungsfunktionalität (TOPAS). Das auf dem Flexity Zürich verbaute ODAS-System fungiert als Basis für das Frontal-Airbag-System.

Für die Anwendung auf Hauptbahnen wurden vorgängig mehrere Pilotprojekte mit einem Kollisionswarnsystem namens PERCEPT, welches sich eines neuronalen Netzwerkes zu Nutze macht, durchgeführt. Damit können Weichenstellungen, Signalzustände und Hinweistafeln durch eine künstliche Intelligenz ausgewertet werden. Diese Informationen können genutzt werden, um auf dem Fahrzeug entsprechende Funktionalitäten umzusetzen.

In einem ersten Schritt muss die ALSTOM PERCEPT Plattform für den Tram-Anwendungsfall adaptiert werden, nachfolgend als Fahrerassistenzsystem bezeichnet. In einem zweiten Schritt soll mit Hilfe eines Datenrekorders die Datenerfassung der verschiedenen verbauten Sensoren erfolgen. Eine Übersicht der verwendeten Sensoren ist in Abbildung 14 ersichtlich. Die erhobenen Daten werden verwendet, um das neuronale Netzwerk zu trainieren. Während der Datenerfassungsphase werden die Spezifikation und die Implementierung der Anwendungsfälle des Fahrerassistenzsystems erstellt und umgesetzt.



Abbildung 14 Übersicht über die Einbaupositionen der verwendeten Sensoren

Zeitgleich werden die Anwendungsfälle für den Frontal-Airbag definiert. Entwicklungen für Passantenairbags gab es im Automobilbereich bereits vor einigen Jahren. Allerdings ging dieser nur vereinzelt in Serie. Im Trambereich stellt der Fussgängerairbag ein Novum dar. ALSTOM führte im Jahr 2022/2023 zusammen mit der VBZ bereits Tests mit einem reaktiven Airbag durch, welcher ein Überrollen von Personen verhindern soll. Im Rahmen des ZEUS-Projektes wird ein innovativer und neuartiger Frontairbag entwickelt, welcher proaktiv entfaltet wird. Durch die Aktivierung des Airbags vor einem allfälligen Primäraufprall, lässt sich der Schweregrad der Verletzungen um ein Vielfaches minimieren. Allerdings gestaltet sich eine solche Aktivierung wesentlich komplizierter als eine reaktive Auslösung eines Airbags.

Die Kombination der zwei Systeme inklusive der Entwicklung eines neuartigen und innovativen Airbags sollen dazu führen die gesetzten Projektziele zu erreichen. Die Entwicklung erfolgt über mehrere Innovationszyklen mit anschließenden Testsessionen bis hin zur finalen Validierung und Präsentation gegenüber den gesetzten Projektzielen.

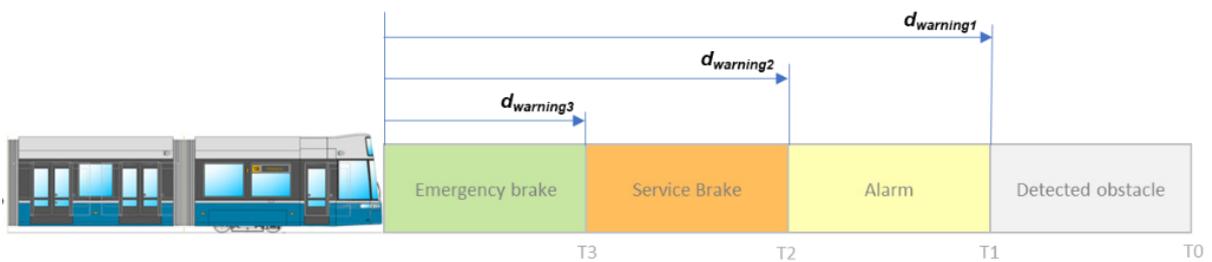


Abbildung 15 Verhalten Kollisionswarnsystem bei Erkennen einer bevorstehenden Kollision

## 4. Ergebnisse

Das Erreichen der Projektziele wurde über mehrere Tests im Depotareal der VBZ validiert. Zwischen den einzelnen Testphasen war das Tram passiv im Regelbetrieb mit Passagieren auf unterschiedlichen Strecken unterwegs. Die Ergebnisse zu den einzelnen Projektzielen sind nachfolgend zu finden.

### Projektziel 1 – Kollisionsvermeidung bei Betriebsgeschwindigkeit

Die Erfüllung des Ziels Kollisionen bei Betriebsgeschwindigkeit zu vermeiden konnte gezeigt werden. Dies sowohl für sich bereits in der Fahrstrasse befindliche Objekte als auch mit Objekten, welche kurzfristig in den Fahrweg bewegt wurden und eine Gefahrenbremse erforderten. Eine Verbesserung der Erkennungsgenauigkeit der Fahrstrasse wird eine Gesamtleistungssteigerung des Systems ermöglichen.

Die Erkennung von Hindernissen bis zu 200 m Entfernung konnte nur teilweise erfüllt werden. Es resultierte eine gute Erkennung des Fahrwegs bis circa 60 m. Für die Objektklassen Autos und Personen sogar bis 100 m.



Abbildung 16 *Erkannte Objekte im Sichtbereich. Rot markiert ist eine Gefahr im Gleisbereich.*

### Projektziel 2 – Geschwindigkeitsüberwachung mit Signalerkennung

Die Implementierung der Signalerkennung für Geschwindigkeitstafeln hat gezeigt, dass vorherrschende Liniengeschwindigkeiten erkannt werden können. Das System hat die Fahrt des Fahrzeugs entsprechend auf die vorgegebene Maximalgeschwindigkeit überwacht, den Fahrer gewarnt und ist bei Geschwindigkeitsüberschreitungen eingeschritten. Dies konnte sowohl für den Bereich vor als auch für den Bereich nach einer Geschwindigkeitstafel nachgewiesen werden.

Das System war zudem in der Lage die vorherrschenden Liniengeschwindigkeiten mit temporären Geschwindigkeitslimiten zu überlagern und diese zu gegebenem Zeitpunkt wieder aufzuheben. Temporäre Maximalgeschwindigkeiten sind beispielsweise für das Befahren von Kurven und Weichen notwendig.

<p>Beispiele für <b>Liniengeschwindigkeitsvorgaben</b> (12 km/h &amp; 24 km/h)</p>	
<p>Beispiele für <b>temporäre Geschwindigkeitsvorgaben</b> (12 km/h-Kurve, Weichenstellungsmelder und Weichen-/Kreuzungsbereiche 24 km/h)</p>	

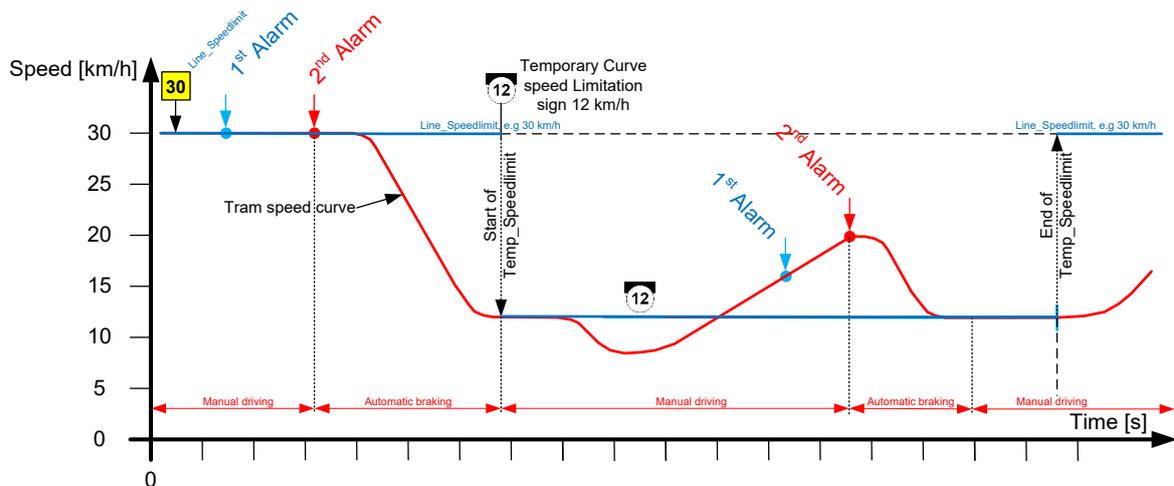


Abbildung 17 Prinzip der Geschwindigkeitsüberwachung vorgegeben durch Liniengeschwindigkeiten und temporären Geschwindigkeitsrestriktionen.

Mit den im Projekt vorherrschenden Limitierungen bezüglich der Fahrzeugintegration konnte keine ideale Geschwindigkeitsregelung erreicht werden. Die Bremsung wurde vom Fahrzeug bei deutlich niedrigeren Geschwindigkeiten als die Zielgeschwindigkeit aufgehoben, obwohl das ZEUS-System längst die Bremsanforderung aufgehoben hatte.



Abbildung 18 Screenshot mit erkannter Geschwindigkeitstafel

### Projektziel 3 – Überwachung der Einhaltung von Fahrsignalen

Wie bei den Geschwindigkeitstafeln gestaltete sich die Erkennung der verschiedenen Zustände der Fahrsignale schwerer als die Objektklassifizierung. Dies hatte zwei Gründe. Zum einen unterscheidet sich das Gesamtbild eines in Fahrt beziehungsweise auf Stopp stehenden Signal nicht so stark, wie sich beispielsweise die Objektklasse Auto von der Objektklasse Person unterscheidet. Zum anderen wurden aufgrund der geringeren Vorkommnisse solcher Signale auf dem Streckennetz weniger Bilder annotiert, mit welchen die künstliche Intelligenz trainiert worden ist. Dementsprechend fiel der künstlichen Intelligenz die genaue Erkennung der Signalzustände schwerer.

Bei korrektem Erkennen der Signalzustände hat das Fahrerassistenzsystem korrekt reagiert und bei Fahrt zeigenden Signalen nicht eingegriffen. Im Falle von Stopp zeigenden Signalen hat das System bei ausbleibenden Reaktionen des Fahrers interveniert und nach der zunächst erfolgten Warnstufe das Fahrzeug vor dem Signal zum Stillstand gebracht.

Beispiele für <b>Fahrsignale (dynamisch)</b> Punktsignale und Weichenstellungsmelder	
---	---

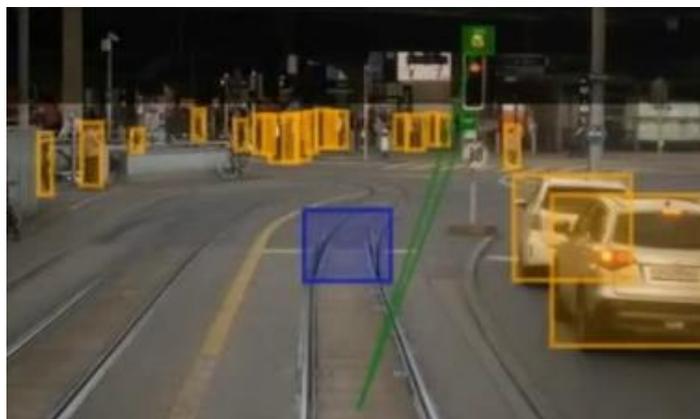


Abbildung 19 Screenshot mit erkannter Weiche, Weichenstellungsmelder und Punktsignal

### Projektziel 4 – Klassifizierung von Objekten

Mit Hilfe einer länger andauernden Aufnahmephase wurde Bildmaterial gesammelt, um die künstliche Intelligenz zu trainieren. In einem zweiten Schritt wurden mehrere tausend Bilder ausgewertet und die einzelnen Objekte darin klassifiziert. Insgesamt wurden neun Objektklassen definiert, wobei das Hauptinteresse darin bestand zu unterscheiden, welche Objektklassen zukünftig durch ein Auslösen des Airbags geschützt werden sollen und bei welchen es keinen Airbag benötigt.

Die Auswertung hat klar aufgezeigt, dass Objektklassen mit vielen Annotationen deutlich zuverlässiger korrekt erkannt wurden als Objektklassen mit wenigen Annotationen.

Klassifizierungen ungeschützter oder rudimentär geschützter Verkehrsteilnehmer → Frontal-Airbagauslösung	
Klassifizierungen von Verkehrsteilnehmer die bereits durch Helm, Chassis etc. geschützt sind. → Keine Frontal-Airbagauslösung	

### Projektziel 5 – Erkennung Kollisionsrisiko Nahbereich – Frontal-Airbag

Gegenüber den ALSTOM - Serienprodukten konnte die Robustheit der Erkennung des Kollisionsrisikos im Nahbereich erfolgreich erhöht werden. Dies konnte mit zusätzlicher Sensorik erreicht werden und ist unumgänglich für eine optimale Aktivierung der Airbags.

Während dem regulären Passagierbetrieb des Trams auf dem Streckennetz lief das System passiv mit und zeigte eine eindruckliche Performance. Während knapp einem Jahr passivem Betrieb erkannte es mehrere True Positives (einer davon ist in der Abbildung 20 ersichtlich) bei lediglich einem False Positive.

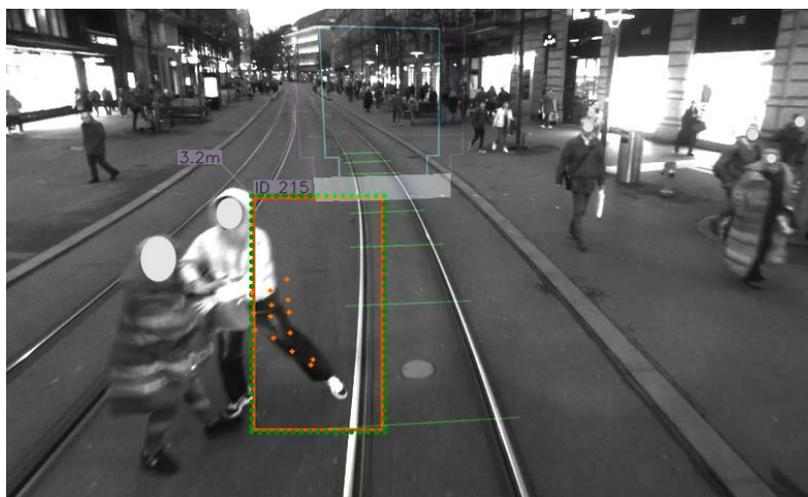


Abbildung 20 Kollisionsrisikoerkennung Nahbereich – Reale Situation in der das System automatisch gebremst und der Frontal-Airbag aktiviert worden wäre

### Projektziel 6 – Effektive Entfaltung des Frontal-Airbags

Innerhalb des ZEUS-Projekts wurde von Grund auf ein neuartiger Frontal-Airbag entwickelt, mit dem Ziel Passanten bei einer Kollision mit einem Tram zu schützen und die Verletzungsfolgen zu minimieren. Über etliche Entwicklungszyklen wurde die ideale Form eines solchen Airbags hergeleitet. Die korrekte Platzierung der für die Aufblasung benötigten Gaspatronen, die richtige Faltung und Unterbringung im Airbag Container sowie die Verwendung der richtigen Materialkombinationen mussten iterativ erarbeitet werden. Alles unter der Rahmenbedingung einer reproduzierbaren Entfaltung innerhalb der kurzstmöglichen Zeit. Trotz einer Halbierung der initialen Entfaltungszeit wurde das Ziel einer Entfaltung innerhalb 0,5 Sekunden bisher knapp verfehlt.

Die Verringerung der Wucht des Primärschocks, dem zweiten Teilziel des Projektziels 6, konnte vollumfänglich für Kollisionen mit Geschwindigkeiten von bis zu 30 km/h gezeigt werden. Der Airbag agiert als effektiver Schutz für die in die Kollision verwickelte Person, unabhängig ob dies ein Kind oder eine erwachsene Person ist. Der zusätzlich entwickelte und anfänglich nicht im Projekt vorgesehene Unterflur-Airbag verhindert ein nachfolgendes Überrollen der Person durch das Tram.



Abbildung 21 Projektziel 6 – Entfaltung des Frontal-Airbags während der BAV-Präsentation

## 5. Diskussion

### Projektziel 1 – Kollisionsvermeidung bei Betriebsgeschwindigkeit

Es konnte gezeigt werden, dass das System erfolgreich vor Kollisionen bei Betriebsgeschwindigkeit warnt und im Falle einer ausbleibenden Handlung des Fahrers der Situation entsprechende Bremsungen vom Fahrzeug anfordert. Äusserst eindrücklich waren die eingeleiteten Gefahrenbremsungen im Falle, dass eine Betriebsbremsung nicht mehr ausreichte, um das Fahrzeug vor dem Objekt zum Stillstand zu bringen. Natürlich muss bei der Anwendung der Gefahrenbremsung der Umstand betrachtet werden, dass im Tram durch umfallende Personen Verletzungen auftreten können.

Definitiv verbessert werden muss die Erkennungsgenauigkeit des Fahrwegs. Verglichen zur Anwendung bei Hauptbahnen, kommt bei den Tramstrecken die Einbettung der Schienen in Asphalt erschwerend dazu. Dadurch lassen sich Stellungen von Weichen schlechter erkennen. Zudem erschweren engere Kurvenradien und komplexe Kreuzungsstellen die korrekte Ermittlung des zu erwartenden Fahrwegs und damit die Erkennung einer bevorstehenden Kollision. Die Implementierung einer Objektverfolgung inklusiver Trajektorienberechnung würde zu einer Reduktion von Falscherkennungen und demzufolge zu einer Leistungssteigerung beitragen.

Das gesetzte Projektziel für die Erkennung von Hindernissen bis 200 m konnte nicht vollumfänglich erreicht werden. Der passive Testbetrieb zeigte jedoch, dass im städtischen Tramverkehr Erkennungsdistanzen von 200 m nicht notwendig sind und die erreichten Distanzen ausreichend sind.

Eine tiefer verwurzelte Integration des Systems in die Fahrzeugleittechnik würde zusätzlich zu einer Leistungssteigerung beitragen.

### Projektziel 2 – Geschwindigkeitsüberwachung mit Signalerkennung

Bei den Verkehrsbetrieben Zürich werden Tafeln für Liniengeschwindigkeit und Kurvengeschwindigkeit unterschieden. Bei der Liniengeschwindigkeit wurden alle vorkommenden Tafeln trainiert, bei den Kurvengeschwindigkeit konzentrierte man sich auf die 12 km/h Tafel. Es konnte deutlich gesehen werden, dass die Erkennungsgenauigkeit für Geschwindigkeitstafeln deutlich geringer ausfällt als beispielsweise für Personen. Dies hat zum einen mit der äusserst geringen Anzahl von annotierten Bildern zu tun. Zum anderen mit feineren Unterschieden zwischen den verschiedenen Geschwindigkeitstafeln.

Die Erkennungsgenauigkeit könnte markant gesteigert werden, wenn die künstliche Intelligenz mit mehr annotierten Daten trainiert würde. Aufzeichnungen mit mehr als einem Fahrzeug oder die Ausrüstung der ganzen Flotte würden dieses Problem automatisch lösen.

Für eine lückenlose Geschwindigkeitsüberwachung müssten zudem die restlichen Kurvengeschwindigkeitstafeln angelernt werden. Zusätzlich müssten die Zusatztafeln mit Hinweispfeilen oder Text annotiert werden, um der künstlichen Intelligenz die Verarbeitung dieser Daten zu erlauben.

Die Warnung und das Einbremsen des Fahrzeuges bei Geschwindigkeitsüberschreitungen sind erfolgt. Dies sowohl bei sichtbarer, als auch bei nicht mehr sichtbarer Geschwindigkeitstafel innerhalb des geschwindigkeitsbeschränkten Bereichs. Mit der gewählten Implementierung ins Fahrzeug wurde das Fahrzeug nach einem Eingriff des Systems deutlich unter die gewünschte Zielgeschwindigkeit eingebremst. Mit einer tieferen Einbettung in die Fahrzeugleittechnik wäre für die Geschwindigkeitsüberwachung definitiv eine verbesserte Geschwindigkeitsregulierung möglich.

### Projektziel 3 – Überwachung der Einhaltung von Fahrsignalen

Für Punktsignale und Weichenstellungsmelder konnte erfolgreich gezeigt werden, dass der Fahrer entsprechend den Stellungen der Signale vom Fahrerassistenzsystem gewarnt wurde und das Fahrzeug bei ausbleibender Reaktion vor Halt zeigenden Signalen zum Stillstand gebracht worden ist.

Ähnlich wie bei den Geschwindigkeitssignalen herrschen nur leichte Unterschiede zwischen den verschiedenen Signalzuständen vor, wofür die künstliche Intelligenz deutlich mehr annotierte Daten benötigt, um den angezeigten Signalzustand richtig zu klassifizieren. Des Weiteren muss die Zuordnung der Signale zum Fahrweg verbessert werden. Dazu gehört eine Verbesserung der Fahrwegerkennung an sich, sowie eine zusätzliche Auswertung der Zusatztafeln mit Hinweispfeilen oder Text, um auf die relevanten Signale zu reagieren.

In einzelnen Fällen kommt es aufgrund der abweichenden Position der Sensoren gegenüber dem Kopf des Fahrers zu abweichenden Wahrnehmungen bezüglich der geeigneten Anhaltedistanz vor dem Signal (im heutigen Realbetrieb wird das Tram an Haltestellen zum Anhalten gebracht wo der Fahrer das Signal noch einsehen kann, die Kameras dieses aber nicht mehr erfassen können).

#### **Projektziel 4 – Klassifizierung von Objekten**

Die Testergebnisse haben gezeigt, dass eine gute Klassifizierung von Objekten erreicht worden ist. Insbesondere für die Klassen, für welche am meisten Bilder annotiert worden sind (z.B. Personen und Autos), ist die Objektklassifizierung auch in komplexen Situationen mit einer grossen Anzahl von Objekten gegeben. Während dem Betrieb eher selten auftretende Objekte (z.B. Tiere, bestimmte Signaltafeln) waren zum Zeitpunkt des Projektabschlusses aufgrund des seltenen Auftretens unzureichend trainiert und werden dementsprechend schlechter erkannt. Ein besseres Anlernen im grossen Stil wird dazu beitragen, die Anzahl der falschen Detektionen weiter zu minimieren. Da das ZEUS-System lediglich auf einem Testfahrzeug integriert worden ist, war eine ausführlichere Datenerhebung und eine damit einhergehende Annotation von einer grossen Menge von Bildern während der Aufzeichnungsphase nicht möglich.

#### **Projektziel 5 – Erkennung Kollisionsrisiko Nahbereich – Frontal-Airbag**

Im Projektzeitraum konnte die Robustheit der Erkennung eines Kollisionsrisikos - verglichen zum ODAS-Serienprodukt – im Nahbereich erfolgreich erhöht werden. Zusätzliche Sensorik erlaubte es die Anzahl von False Positives drastisch zu reduzieren, ohne dabei die Empfindlichkeit des Systems zu verringern. Dies konnte über längere Zeit im Regelbetrieb erfolgreich evaluiert werden. Bei mehreren Kollisionen / Beinahe-Kollisionen während dem passiven Testbetrieb hat das System richtig reagiert. Während dieser Zeit gab es lediglich eine falsche Detektion. In einem nächsten Schritt muss die Sensorik optimiert werden, um ein insgesamt kostengünstigeres System ermöglichen zu können.

#### **Projektziel 6 – Effektive Entfaltung des Frontal-Airbags**

Mit Hilfe der grossen Anzahl an Entwicklungszyklen und Testsessionen konnte die Entfaltung und Energieaufnahme des Frontal-Airbags stetig weiterverbessert werden. Durch die optimierte Anbringung der Gaspatronen und einer optimalen Faltung des Airbags konnte eine reproduzierbare und symmetrische Öffnung des Frontal-Airbags erreicht werden.

Die Testergebnisse haben mehrfach gezeigt, dass der Frontal-Airbag jeglichen Kontakt zwischen Körper und Tram bei Kollisionsversuchen mit Geschwindigkeiten von bis zu 30 km/h verhindert. Dies sowohl bei Tests mit einem Erwachsenen-Dummy als auch bei Tests mit einem Kinder-Dummy.

Mit Hilfe des Unterflur-Airbags kann zudem effektiv das Überrollen der am Unfall beteiligten Person verhindert werden.

Im Hinblick auf eine Serialisierung muss die Integration ins Fahrzeug optimiert werden, um einen schnelleren Ein- bzw. Ausbau des Systems zu ermöglichen. Dies minimiert die Betriebsstörung und die Standzeit des Fahrzeuges nach einer Airbag-Auslösung. Des Weiteren muss die Entfaltungsgeschwindigkeit weiter erhöht werden. Dadurch resultiert eine kürzere Reaktionszeit, wodurch der Zündbefehl für die Inflation des Airbags zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen kann. Ein späterer Zündbefehl wird dazu beitragen, dass es im Betrieb zu weniger Airbag - Auslösungen kommt, in welcher eine Kollision noch vermieden werden kann. Zudem muss das elektronische System optimiert werden, damit ein kostengünstigeres System angeboten werden kann. Mit einem verbesserten Kosten/Nutzen Verhältnis, steigt die Attraktivität für die Betreiber ein solches System zu bestellen und zu verwenden.

## 6. Kosten-Nutzen-Analyse

Gemäss dem BAV kann bei einer schwerverletzten Person mit Kosten von 650'000 CHF gerechnet werden. Für eine verstorbene Person sogar mit 6'500'000 CHF [4].

Aus den Schadensstatistiken der VBZ und des BAV lassen sich damit relativ leicht die Kosten der Unfälle mit schwerverletzten oder toten Personen berechnen. Schwieriger beziffern lassen sich die weiteren Kosten, welche solche Unfälle für die Betreiber nach sich ziehen. Es kommen Kosten für die Betreuung des betroffenen Fahrpersonals, Kosten für die Unterbrechung vom Betrieb oder den Extraaufwänden für Umleitungen und Sperrungen hinzu. Dazu eventuelle Imageverluste, sowie vorübergehende Einschränkungen für die Allgemeinheit. Davon ausgeschlossen sind die personellen Tragödien für die betroffene Person und ihr Umfeld, welche sich nicht in Zahlen, respektive Kosten beziffern lassen.

Aufgrund der vorliegenden Schadensstatistik der VBZ ist von 2.5 Todesfällen pro Jahr mit Trams auszugehen. Dies resultiert in Kosten von 16.25 Millionen Franken. Noch nicht berücksichtigt sind weitere finanzielle Folgeschäden, Kollisionen mit Fahrzeugen sowie Unfälle mit schwerverletzten Personen.

Mit Hilfe der schweizweiten Schadensstatistik vom BAV lassen sich die national anfallenden Kosten berechnen. Aufgrund von durchschnittlich 11.4 schwerverletzten und einer getöteten Person beziffern sich die Kosten für Zusammenstösse mit Strassenfahrzeugen auf 13.91 Millionen Franken. 23.92 Millionen Franken resultieren aus dem An- und Überfahren von Personen. Zusammengerechnet ergeben dies durchschnittliche Kosten von 37.83 Millionen Franken pro Jahr. Auch in dieser Betrachtung sind die weiteren finanziellen Folgeschäden für den Betreiber ausgeschlossen, womit die effektive Zahl einiges höher ausfallen dürfte.

Die Annahme, dass mit einem intelligenten Kollisionswarnsystem und einem proaktiven Airbag alle diese Unfälle vermieden und die daraus resultierenden Kosten eingespart werden könnten, wäre illusorisch. Dennoch könnte ein Fahrerassistenzsystem wie es im Rahmen des ZEUS-Projektes entwickelt und verwendet worden ist die Eintrittshäufigkeit von Kollisionen deutlich reduzieren, oder aber den Schweregrad des Unfalls, besonders mit Passanten markant verringern.

Basierend auf dem im ZEUS – Projekt verwendeten prototypischen System kann mit Kosten in einer Grössenordnung von 60'000 Franken ausgegangen werden. Unter dieser Annahme würde dies für die Basisbestellung von 70 Flexity Zürich zu Investitionskosten von 4.2 Millionen führen. Bereits bei der Verhinderung einer toten Person wären die Investitionskosten beglichen.

Im Rahmen des Projektes wurde eine ganze Bandbreite von Sensoren verwendet, um die technisch geeignetste Kombination zu ermitteln. Dementsprechend sind die Kosten für das jetzige prototypische System höher als für ein Serienprodukt. Mithilfe von Sensor- und Hardwareoptimierungen wird eine Verringerung der Kosten für ein Serienprodukt erreicht werden können.

## 7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Projektergebnisse haben die Machbarkeit der initial gesetzten Projektziele für das ZEUS – Projekt gezeigt. Die notwendigen Funktionalitäten konnten für jedes einzelne Projektziel implementiert und erfolgreich getestet werden. Besonders grosse Fortschritte konnten im Bereich des Airbags und dessen Auslösung erzielt werden.

Insgesamt konnten durch dieses Projekt die Grundlagen für die nächste Generation von Fahrerassistenzsystemen, welche sich künstliche Intelligenz zunutze machen, sowie dem Passantenschutz mit Hilfe eines proaktiv gezündeten Airbags erarbeitet werden.

Besonders hilfreich und unumgänglich war dabei das iterative Vorgehen. Vor allem für Systeme, welche von Grund auf neu entwickelt werden, macht dieses Vorgehen Sinn. Es erlaubt regelmässig und in kurzen Zeitabschnitten gemachte Erfahrungen aus den Tests in die weitere Entwicklung des Systems hineinfließen zu lassen. Dies verhindert die Entwicklung eines nicht anwendungsfähigen Produktes.

Die regelmässigen Tests auf den Testgleisen in der VBZ Zentralwerkstätte erlaubten eine mehrfache Validierung der Zwischenergebnisse und halfen das weitere Vorgehen und die Entwicklungsrichtung auf Basis dieser Resultate zu korrigieren. Der passive Betrieb, während dem Passagierregelbetrieb half das Verhalten der Systeme ausserhalb der kontrollierten Depotumgebung im deutlich komplexeren Stadtverkehr zu beobachten, die entsprechenden Schlüsse zu ziehen und die daraus resultierenden Implementierungen in der nächsten Depottestsession zu überprüfen.

Für die zu Beginn des Projektes notwendige Datenerhebung für das Anlernen der Objekt- und Signalklassen für die künstliche Intelligenz, wäre es äusserst hilfreich gewesen, mehr als nur ein dafür ausgerüstetes Fahrzeug im Einsatz zu haben. Wie für verschiedene Objekt- und Signalklassen ersichtlich war, steht und fällt die präzise Erkennung durch die künstliche Intelligenz mit einer ausreichend grossen Anzahl von annotierten Trainingsbildern. Aufgrund unterschiedlicher Präsenz der verschiedenen Objektklassen auf dem Streckennetz ist es mit einem einzelnen Fahrzeug gar nicht möglich genügend solcher Trainingsbilder aufzunehmen. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit seltene Objekte und Situationen aufgenommen zu haben sehr gering. Aus den zuvor genannten Gründen wäre es für die Datenerhebung vorteilhaft, wenn ein grösserer Teil der Flotte an dieser beteiligt wäre.

Die nächsten Schritte für das ZEUS – Projekt sehen hauptsächlich Optimierungen vor. Diese sind von kommerzieller, technischer und betrieblicher Natur. Während dem Projektzeitraum wurde der Fokus auf die funktionellen Aspekte gelegt. Nun geht es darum, Rücksicht auf die betrieblichen Aspekte zu nehmen. Die Erkennungsgenauigkeit und Robustheit müssen weiter gesteigert werden. Zudem muss die Auslösezeit für den Airbag verringert werden. Beides führt zu einer besseren Performance in Bezug auf True und False Positives. Des Weiteren muss an einer einfachen Demontage und einem benutzerfreundlichen Wiedereinbau gearbeitet werden. Zusätzlich muss das Gesamtsystem kostenoptimiert werden, um dem Kunden ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis anbieten zu können.

### Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

**AI** – Artificial Intelligence

**BAV** – Bundesamt für Verkehr

**COMPAS** – Collision & Overspeed Monitoring / Prevention Assistance System

**FOT** – Federal Office of Transportation (englische Bezeichnung BAV)

**IA** – Intelligence Artificielle

**KI** – Künstliche Intelligenz

**LRV** – Light Rail Vehicle

**ODAS** – Obstacle Detection Assistance System

**OFT** – Office fédéral des transports (französische Bezeichnung BAV)

**PERCEPT** – AI basiertes Fahrerassistenzsystem

**TOPAS** – Tramway Overspeed Prevention Assistance System

**VBZ** – Verkehrsbetriebe Zürich

**ZEUS** – Zürich Experiment für Umfassende Sicherheit

## Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Verkehr BAV Sicherheit, [https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/aktuell-startseite/berichte/sicherheit/sicherheitsbericht\\_2022.pdf.download.pdf/Sicherheitsbericht\\_2022\\_de\\_BAV.pdf](https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/aktuell-startseite/berichte/sicherheit/sicherheitsbericht_2022.pdf.download.pdf/Sicherheitsbericht_2022_de_BAV.pdf), 28.05.2024.
- [2] VBZ-Unfallstatistiken, Schadensdienst VBZ
- [3] VBZ Schadenstatistik 2023, <https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/vbz/Deutsch/Ueber%20das%20Departement/Medienmitteilungen/2023/Jahres-Schadenstatistik%202018%20-%202023.pdf> , 11.06.2024.
- [4] Bundesamt für Verkehr BAV Sicherheit, <https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/uebergeordnete-themen/sicherheit/sicherheitspolitik-v-1-4.pdf.download.pdf/sicherheitspolitik-v-1-4.pdf>, 15.08.2024.

## Anhang

Keine

\*\*\*