



Automatisiertes Fahren im Strassentunnel – Chancen, Risiken und ideale Strecken

**Automated driving in road tunnels - opportunities, risks and
ideal routes**

**Conduite automatisée dans les tunnels routiers - chances,
risques et trajets idéaux**

Amstein + Walthert Progress
Dr. Andreas van Linn
Dr. Reto Schneider

ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
Dr. Anastasios Kouvelas
Dr. Michail Makridis
Dr. Alexander Genser

**Forschungsprojekt BGT_20_09A_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Brücken, Geotechnik und Tunnel (AG BGT)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Automatisiertes Fahren im Strassentunnel – Chancen, Risiken und ideale Strecken

**Automated driving in road tunnels - opportunities, risks and
ideal routes**

**Conduite automatisée dans les tunnels routiers - chances,
risques et trajets idéaux**

Amstein + Walthert Progress
Dr. Andreas van Linn
Dr. Reto Schneider

ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
Dr. Anastasios Kouvelas
Dr. Michail Makridis
Dr. Alexander Genser

**Forschungsprojekt BGT_20_09A_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Brücken, Geotechnik und Tunnel (AG BGT)**

Oktober 2023

1760

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Andreas van Linn

Mitglieder

Dr. Reto Schneider

Stephen Lingwood

Marco Zbinden

Dr. Anastasios Kouvelas

Dr. Michail Makridis

Dr. Alexander Genser

Begleitkommission

Präsident

Dominique Morel

Mitglieder

Christian Gammeter

Markus Eisenlohr

Arnd König

Thomas Sauter-Servaes

Amin Amini

Bernhard Gerster

KO-Finanzierung des Forschungsprojekts

Amstein +Walthert Progress

ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)

Antragsteller

Arbeitsgruppe Brücken, Geotechnik und Tunnel (AG BGT)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
1.1 Ausgangslage	13
1.2 Tunnelsicherheit	15
1.3 Hypothese und Ziele des Forschungsprojektes	16
1.3.1 Abgrenzung	16
1.4 Vorgehen	17
2 Stand der Forschung und Technik	19
2.1 Einführung	19
2.2 Sicherheit und Effizienz in Tunnels	20
2.3 Vergleich mit offenen Strassen	22
2.4 Bewertungsinstrumente	23
2.5 Verständnis der wichtigsten Betriebseigenschaften von hochautomatisierten Fahrzeugen	24
2.6 Automatisierungsgrad und Klassen der Zusammenarbeit	24
2.7 Sensoren in teilautomatisierten Fahrzeugen (alle Stufen)	26
2.8 Fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme	27
2.9 Leistungsbewertung von ADAS in Tunneln	27
2.9.1 Adaptive Cruise Control / Adaptiver Tempomat	27
2.9.2 Automatic Emergency Braking / Automatische Notbremsung	28
2.9.3 Lane Departure Warning / Spurverlassen Warnung	29
2.10 Leistungsbewertung von CAVs unter den derzeitigen Annahmen	29
2.11 Mögliche Vorteile von CAVs und dem Tunnelbau	29
2.12 Schlussfolgerung	30
3 Anforderungen an Strassentunnel	33
3.1 Methodik	33
3.2 Ergebnisse	33
3.2.1 Übersicht mögliche Kriterien und Massnahmenklassen:	33
3.2.2 Auswahlkriterien und Kriterienklassen:	35
3.2.3 Positive Eigenschaften von Tunnels	36
3.2.4 Negative Eigenschaften von Tunnels	36
3.2.5 Grösste Herausforderungen	36
3.2.6 Erwartete Verbesserungen	37
3.2.7 Neue Aspekte aus der Bearbeitung der Fragebogen und der Workshops	37
3.2.8 Eigenschaften der Sensorik	37
3.2.9 Leistungseinbussen bei der Sensorik in Tunnels	37
3.2.10 Sicherheitsrelevante Leistungseinbussen bei der Sensorik in Tunnels	37
3.2.11 Zusammenfassung der Resultate	38
4 Beurteilungskriterien	39
4.1 Kategorien	39
4.2 MUSS-Kriterien	39
4.3 KANN-Kriterien	39
4.4 Weiche Kriterien	40
4.5 Weitere - weiche Kriterien und Testlaufplanung	40
5 Hypothesenüberprüfung und Objektliste	41

5.1	Ermittlung von idealen Tunnelstrecken als Teststrecken für automatisiertes Fahren.....	41
5.1.1	Tunneldatenbank	41
5.1.2	Kontaktadressen der Filialen:	41
5.1.3	Auswahlkriterien	42
5.1.4	Auswahlmethode.....	44
5.2	Liste ausgewählter Tunnels	45
5.3	Umsetzbarkeit in der Praxis.....	45
5.3.1	Auswertung der Gespräche mit den Filialen 1,2,4 und 5:	47
5.4	Weiterer Forschungsbedarf	47
	Anhänge	49
	Glossar	71
	Literaturverzeichnis	73
	Projektabschluss.....	79

Zusammenfassung

Selbstfahrende intelligente Fahrzeuge bringen ein neues Fahrverhalten in die Strassenverkehrssysteme ein, welches die derzeitigen Verkehrsnetze verändern wird, besonders in Anbetracht des noch über lange Zeit zu erwartenden Mischverkehrs. Die strategische Ausrichtung des ASTRA umfasst das ausdrückliche Ziel, dass bis im Jahr 2030 auf Nationalstrassen hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge verkehren können. Zur Zielerreichung sind sowohl die gesellschaftliche Akzeptanz dieser neuen Mobilitätsform zu fördern als auch die technische und betriebliche Machbarkeit zu testen. Eine wichtige Voraussetzung für erste Testanwendungen unter realen Verkehrsbedingungen ist die Ermittlung idealer Strecken. In diesem Forschungsprojekt haben wir folgende Hypothese untersucht: **"Tunnel auf Hochleistungsstrassen sind prädestinierte Infrastrukturen zur Förderung des hoch- und vollautomatisierten Fahrens"**. Weil es für solche Systeme noch keine standardisierten Betriebsmerkmale und Erfahrungswerte aus der Praxis gibt, haben den aktuellen Stand der Forschung und Technik zusammengefasst. Daraus wurde ersichtlich, dass das Verhalten automatisierter Fahrzeuge unter bestimmten Infrastrukturbedingungen, wie z. B. in Tunneln und bei ungünstigen Wetterbedingungen, weiterhin unklar bleibt. Während die Sicherheit und Effizienz des Fahrens in Tunneln derzeit mit Faktoren wie Ablenkung des Fahrers, Beleuchtung und Verkehrsfluss in Verbindung gebracht werden, stellt die Einführung hochautomatisierter Fahrzeuge eine grosse Herausforderung für das Verständnis ihrer Auswirkungen auf die Tunnelsicherheit dar. Die heute für das automatisierte Fahren verwendeten Sensoren wie Kameras, LiDARs¹ und Radare zeigen unter realen Bedingungen einen erheblichen Leistungsabfall, und es werden massgeschneiderte Testverfahren für ADAS² benötigt, um den ordnungsgemässen Betrieb autonomer Fahrzeuge zu gewährleisten. Um diesen Wissenslücken zu füllen und die Hypothese zu testen, wurden Expertenworkshops durchgeführt und ein Fragebogen kreiert, mit welchem Kriterien für geeignete Tunnelstrecken definiert wurden. Mit diesen Kriterien haben wir ausgehend von der TUSI-Liste 23 Tunnels als mögliche Teststrecken für autonomes Fahren ermittelt. In einer anschliessenden Diskussion mit den ASTRA Filialen wurden Liste nochmals eingeeengt und konkret 7 Tunnels als gut geeignet vorgeschlagen. Das Forschungsprojekte zeigt auf, dass die Modernisierung von Tunneln zur Unterstützung automatisierter Fahrzeuge notwendig erscheint, diese beinhaltet unter anderem geeignete Lichtverhältnisse, Unfallerkennungsverfahren, Kommunikationsinfrastrukturen und klare Fahrbahnmarkierungen. AVs³ und CAVs⁴ haben zusätzlich das Potenzial, die Verkehrssicherheit zu verbessern und die Kapazität durch Kommunikation und Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur zu erhöhen. Tunnel können somit auch als Informationszentren für Fahrer genutzt werden, um sie sowohl in normalen als auch in Notfallsituationen zu unterstützen. Das vorliegenden Forschungsprojekt bestätigt die Hypothese, dass «Tunnel auf Hochleistungsstrassen prädestinierte Infrastrukturen zur Förderung des hoch- und vollautomatisierten Fahrens sind. Offen bleibt die Frage, welche flankierenden Massnahmen noch getroffen werden müssen, um Tests mit automatisierten Fahrzeugen im realen Verkehrsbetrieb mit Mischverkehr durchzuführen. Daraus ergibt sich folgender Forschungsbedarf: Es gilt standardisierte Testbedingungen in Tunneln zu entwickeln. Wie müssen Tunnelwände beschaffen sein, um die Sensorik möglichst nicht zu stören? Welche Tunnelbeschaffenheit kann Reflexionen verursachen und unter welchen Umständen werden Sensoren beeinträchtigt. Um diese Unklarheiten zu beseitigen sind Tests unter realen Bedingungen notwendig. Weiter wird die Entwicklung von Testprotokollen und einer standardisierten Messmethodik zur Bewertung der Leistung von Sensoren Gegenstand zukünftiger Forschungsprojekte sein.

¹ LiDAR: Light Imaging detection and ranging

² ADAS: Advanced Driver Assistance System

³ AV: Automated Vehicle

⁴ CAV: Connected Automated Vehicle

Résumé

Les véhicules intelligents autopropulsés introduisent dans les systèmes de circulation routière un nouveau comportement de conduite qui va modifier les réseaux de transport actuels, en particulier compte tenu du trafic mixte auquel il faut s'attendre pendant encore longtemps. L'orientation stratégique de l'OFROU comprend l'objectif explicite que des véhicules hautement et entièrement automatisés puissent circuler sur les routes nationales d'ici 2030. Pour atteindre cet objectif, il convient à la fois de promouvoir l'acceptation sociale de cette nouvelle forme de mobilité et de tester la faisabilité technique et opérationnelle. Une condition importante pour les premières applications de test dans des conditions de circulation réelles est de déterminer les trajets idéaux. Dans ce projet de recherche, nous avons étudié l'hypothèse suivante : "Les tunnels sur les routes à grand débit sont des infrastructures prédestinées pour promouvoir la conduite hautement et entièrement automatisée". Comme il n'existe pas encore de caractéristiques d'exploitation standardisées et de valeurs empiriques issues de la pratique pour de tels systèmes, nous avons résumé l'état actuel de la recherche et de la technique. Il en est ressorti que le comportement des véhicules automatisés dans certaines conditions d'infrastructure, comme dans les tunnels et lorsque les conditions météorologiques sont défavorables, reste incertain. Alors que la sécurité et l'efficacité de la conduite dans les tunnels sont actuellement associées à des facteurs tels que la distraction du conducteur, l'éclairage et la fluidité du trafic, l'introduction de véhicules hautement automatisés constitue un défi majeur pour la compréhension de leur impact sur la sécurité dans les tunnels. Les capteurs utilisés aujourd'hui pour la conduite automatisée, tels que les caméras, les LiDAR et les radars, présentent une baisse de performance considérable en conditions réelles, et des procédures de test sur mesure pour les ADAS sont nécessaires pour garantir le bon fonctionnement des véhicules autonomes. Pour combler ce manque de connaissances et tester l'hypothèse, des ateliers d'experts ont été organisés et un questionnaire a été créé afin de définir des critères pour les tronçons de tunnel appropriés. Grâce à ces critères, nous avons identifié 23 tunnels comme pistes d'essai possibles pour la conduite autonome, en partant de la liste TUSI. Lors d'une discussion ultérieure avec les filiales de l'OFROU, la liste a été encore réduite et 7 tunnels ont été proposés comme bien adaptés. Le projet de recherche montre qu'il est nécessaire de moderniser les tunnels pour soutenir les véhicules automatisés, ce qui implique notamment des conditions d'éclairage appropriées, des procédures de détection des accidents, des infrastructures de communication et un marquage clair de la chaussée. Les AV et les CAV ont en outre le potentiel d'améliorer la sécurité routière et d'augmenter la capacité grâce à la communication et à l'échange d'informations entre les véhicules et l'infrastructure. Les tunnels peuvent donc également être utilisés comme centres d'information pour les conducteurs, afin de les aider à la fois dans des situations normales et d'urgence. Le présent projet de recherche confirme l'hypothèse selon laquelle "les tunnels sur les routes à grand débit sont des infrastructures prédestinées à promouvoir la conduite hautement et entièrement automatisée. La question reste ouverte de savoir quelles mesures d'accompagnement doivent encore être prises pour pouvoir effectuer des tests avec des véhicules automatisés dans une exploitation réelle de la circulation avec un trafic mixte. Il en résulte les besoins de recherche suivants : Il faut développer des conditions de test standardisées dans les tunnels. Comment les parois du tunnel doivent-elles être conçues pour ne pas perturber les capteurs ? Quelle est la nature du tunnel qui peut provoquer des réflexions et dans quelles circonstances les capteurs sont-ils affectés ? Pour lever ces incertitudes, des tests en conditions réelles sont nécessaires. En outre, le développement de protocoles de test et d'une méthode de mesure standardisée pour évaluer la performance des capteurs fera l'objet de futurs projets de recherche.

Summary

Self-driving intelligent vehicles introduce a new driving behavior into road transport systems that will change current transport networks, especially in view of the mixed traffic that is expected to continue for a long time. FEDRO's strategic direction includes the explicit goal of having highly and fully automated vehicles operating on national roads by 2030. To achieve this goal, both the social acceptance of this new form of mobility must be promoted and the technical and operational feasibility must be tested. An important prerequisite for initial test applications under real traffic conditions is the identification of ideal routes. In this research project, we investigated the following hypothesis: "Tunnels on high-performance roads are predestined infrastructures for promoting highly and fully automated driving." Because there are still no standardized operating characteristics and empirical values from practice for such systems, we summarized the current state of research and technology. From this, it became apparent that the behavior of automated vehicles under certain infrastructure conditions, such as tunnels and adverse weather conditions, remains unclear. While the safety and efficiency of driving in tunnels is currently associated with factors such as driver distraction, lighting, and traffic flow, the introduction of highly automated vehicles presents a major challenge to understanding their impact on tunnel safety. Sensors currently used for automated driving, such as cameras, LiDARs, and radars, show significant performance degradation under real-world conditions, and tailored test procedures for ADAS are needed to ensure proper operation of autonomous vehicles. To fill this knowledge gap and test the hypothesis, expert workshops were conducted, and a questionnaire was created to define criteria for suitable tunnel routes. Using these criteria, we identified 23 tunnels as possible test routes for autonomous driving based on the TUSI list. In a subsequent discussion with the ASTRA branches, the list was narrowed down again, and 7 tunnels were suggested as suitable. The research project indicates that upgrading tunnels to support automated vehicles appears necessary, this includes suitable lighting conditions, accident detection procedures, communication infrastructures and clear lane markings. AVs and CAVs additionally have the potential to improve road safety and increase capacity through communication and information exchange between vehicles and infrastructure. Tunnels can thus also be used as information centers for drivers to assist them in both normal and emergency situations. The present research project confirms the hypothesis that "tunnels on high-performance roads are predestined infrastructures for promoting highly and fully automated driving. The question remains open as to which flanking measures still need to be taken to conduct tests with automated vehicles in real traffic operations with mixed traffic. This results in the following need for research: Standardized test conditions in tunnels must be developed. What kind of tunnel walls must be used to avoid disturbing the sensor technology as much as possible? What tunnel conditions can cause reflections and under what circumstances are sensors affected. Tests under real conditions are necessary to eliminate these uncertainties. Furthermore, the development of test protocols and a standardized measurement methodology for evaluating the performance of sensors will be the subject of future research projects.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Vor dem Hintergrund steigender Verkehrszahlen und knapper werdenden Verkehrsflächen muss der Verkehr der Zukunft sicherer und effizienter werden. Selbstfahrende, intelligente Fahrzeuge scheinen hier die Lösung zu bringen. Das ist jedenfalls eines der Versprechen, das die voranschreitende Automatisierung der Mobilität macht [1]. Aber was bedeuten automatisierte Fahrzeuge für besondere Infrastrukturen wie Strassentunnel: Verändern sich dadurch die Sicherheitsrisiken? Ergeben sich Chancen? Und inwiefern werden sich der technische und operative Betrieb adaptieren müssen

Zukunft der Mobilität: Automatisiertes Fahren ist möglich – auch in der Schweiz

Unter der Annahme, dass sich die zukünftige Fahrzeugflotte der Schweiz mit den Trends der historischen Entwicklung verändert, werden erste automatisierte Fahrfunktionen der Automatisierungsstufe 4 für private Fahrzeuge ab dem Jahr 2025 verfügbar sein [2]. Analysen und aktuelle Prognosen [3] zeigen jedoch auch, dass die Flottendurchdringung mit hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen aus ganz unterschiedlichen Gründen weniger schnell von statten gehen wird, als oftmals dargestellt. Für Strassenabschnitte mit grosser Verkehrsbelastung und vergleichsweise hoher Technologisierung bedeutet eine solche ausgedehnte Übergangsphase, dass während einer längeren Zeitspanne ein Mischverkehr⁵ mit konventionell gelenkten und unterschiedlich stark automatisierten Fahrzeugen stattfinden wird, die grosse Auswirkungen auf die Infrastruktur haben wird [4]. Gleichzeitig hat die verzögerte Durchsetzung von automatisierten Fahrzeugen auch zur Folge, dass sich in der längeren Übergangsphase ein gewisser Gestaltungsraum für die öffentliche Hand öffnet, der vorausschauend genutzt werden sollte. Für das Jahr 2050 werden auf Schweizer Strassen rund 32% automatisierte Fahrzeuge prognostiziert (vgl. Abb. 1).

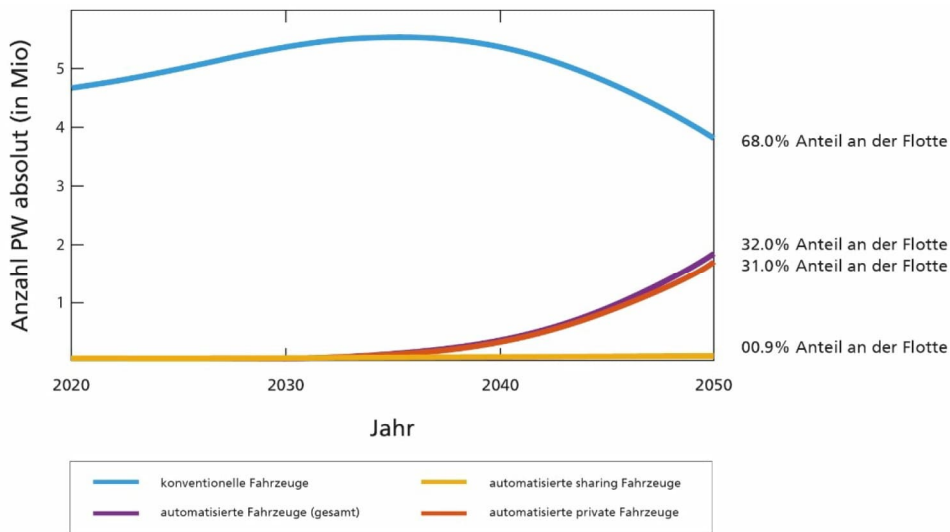


Abb. 1 Prognostizierte Entwicklung des Bestandes der Personenwagen in der Schweiz gemäss Szenario «Trend» [5]

Damit sich diese Entwicklung optimal entfalten kann, muss die Strassenverkehrsinfrastruktur auf die Anforderungen des automatisierten Fahrens ausgerichtet werden. Infrastrukturseitig sind dafür bauliche, technische und digitale

⁵ In Anlehnung an das Forschungspaket des ASTRA [5], wird unter dem Begriff «Mischverkehr» der Verkehr von Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsstufen ausserhalb der Siedlungsgebiete verstanden. Er ist zu unterscheiden vom «Mischverkehr», der im Siedlungsraum zwischen Fussgängern und Zweiradfahrenden sowie motorisierten Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsstufen dauerhaft entstehen wird.

Voraussetzungen zu schaffen, sodass die Verkehrsflächen sowohl durch konventionell gelenkte als auch durch automatisierte Fahrzeuge genutzt werden können. Die Adaption wird aber sukzessive und nicht disruptiv erfolgen. Mit zukunftsorientierten Massnahmen will das ASTRA deshalb im Rahmen seiner Teilstrategie zur intelligenten Mobilität [6] die Infrastruktur kontinuierlich ertüchtigen und auf die sich verändernde Mobilität vorbereiten. Die Anlagen der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) spielen in diesem Zusammenhang eine essenzielle Rolle (Bsp. Kommunikation und Leittechnik, Notrufanlagen, Tunnelfunk etc.)

Hochleistungsstrassen wird eine besondere Bedeutung zukommen

Hochleistungsstrassen wie Autobahnen weisen verschiedene Charakteristika auf, die zentrale Vorteile für das automatisierte Fahren bieten. In der Regel zeichnen sie sich aus durch:

- richtungsgetrennte Fahrbahnen und Schutzeinrichtungen;
- kreuzungsfreie Strecken;
- keinen Langsamverkehr;
- relativ homogene Geschwindigkeitsprofile.

Hochleistungsstrassen verfügen zudem bereits heute über eine einheitliche Infrastrukturausrüstung, werden durch einen professionellen Betreiber unterhalten, sind weitgehend auf dem aktuellen Stand der Technik und führen in der Regel zu wenig komplexen, eher monotonen Fahraufgaben. Unter Berücksichtigung all dieser Einflussfaktoren kommen die Analysen des Teilprojektes 5 des ASTRA-Forschungspaketes deshalb zum Schluss, dass Hochleistungsstrassen vor allen anderen Strassentypen (Bsp. Hauptverkehrsstrassen innerorts oder ausserorts) für die Einführung des automatisierten Fahrens zu präferieren sind [2]. Weitere internationale Studien bestätigen diese Einschätzung [6],[7],[8],[9]. Demzufolge wird aktuell von einer zeitlich gestaffelten Nutzbarkeit der verschiedenen Strassentypen für das automatisierte Fahren in der Schweiz ausgegangen, allen voran jedoch Autobahnen (vgl.

Tab. 1 Prognostizierte Nutzbarkeit der Strassentypen für Automatisierungsstufe 4 [2]

Jahr	2020	2030	2040	2050
Strassentyp				
HLS Autobahn		✓	✓	✓
HVS ausserorts Landstrasse			✓	✓
ES/SS und HVS innerorts Stadt- strassen		✓	✓	✓



Vollumfängliche Nutzbarkeit AF-Level 4 in allen Räumen



Räumlich eingeschränkte Nutzbarkeit AF-Level 4 auf ausgewählten Relationen oder Gebieten (z.B. Stadt Zürich für automatisierte Taxiflotten als Erstanwender 2030 oder z.B. Verbindungsstrecken zwischen HLS-Anschlüssen und bereits für nutzbaren Stadtstrassen 2040)



Strassentyp ist für AF-Level 4 noch nicht nutzbar (Ausnahmen bilden Pilotstrecken)⁶

⁶ SAE-Level 4 umfasst auch Shuttle ohne Lenkrad und Pedallerie (Rayonfahrzeuge), welche grundsätzlich auch auf Überlandstrassen oder gar Autobahnen verkehren dürfen.

Es braucht praktische Erfahrungen auf Nationalstrassen

Die strategische Ausrichtung des ASTRA umfasst das ausdrückliche Ziel, dass bis im Jahr 2030 auf Nationalstrassen hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge verkehren können. Zur Zielerreichung sind sowohl die gesellschaftliche Akzeptanz dieser neuen Mobilitätsform zu fördern als auch die technische und betriebliche Machbarkeit zu testen. Das ASTRA will sich deshalb verstärkt in internationalen Forschungsvorhaben engagieren, um intelligente Mobilitätskonzepte mitentwickeln und erproben zu können. Im Zuge dessen beabsichtigt das ASTRA auch Ausnahmegewilligungen für Pilotversuche auf den schweizerischen Nationalstrassen zu erteilen und praktische Erfahrung mit automatisierten Fahrzeugen zu sammeln [10]

Eine wichtige Voraussetzung für erste Testanwendungen unter realen Verkehrsbedingungen ist die Ermittlung idealer Strecken, sodass das geforderte Sicherheitsniveau im regulären Betrieb nicht unterschritten wird und ein systematisches sowie wissenschaftliches Monitoring jederzeit gewährleistet ist. Da sich die Nationalstrassen aus unterschiedlichen Streckentypen und Objekten zusammensetzen (Bsp. offene Strecken, Tunnel, Ausrüstungsgrad, Verkehrsaufkommen), ist vor einer Pilotanwendung eine auf Kriterien basierende Auswahl geeigneter Strecken unabdingbar.

1.2 Tunnelsicherheit

Mit dem Aufkommen des automatisierten Fahrens und der zunehmenden Tendenz den Strassenverkehr in unterirdische Infrastrukturen zu verlagern [11],[12], stellen sich unweigerlich grundsätzliche Fragen zur zukünftigen Bedeutung von Tunnelobjekten und damit auch zur Tunnelsicherheit. Im Teilprojekt 2 des Forschungspakets «Auswirkungen des automatisierten Fahrens» wurden mittels Modellierungen zwar Aussagen über den Bedarf an Strassenverkehrsinfrastruktur abgeleitet und verschiedene Strassenkategorien verglichen [13]; das Potential und die Risiken von Strassentunneln in Bezug auf das automatisierte Fahren wurden jedoch nicht spezifisch betrachtet. Aktuell ist somit unklar, welche Implikationen das hoch- und vollautomatisierte Fahren für diese in mehreren Hinsichten besonderen Verkehrsinfrastrukturen hat. Strassentunnel sind in der Schweiz nämlich nicht nur häufig – auf dem heutigen Nationalstrassennetz verläuft jeder achte Kilometer in einem Tunnel [14] – sondern sie verfügen im Gegensatz zu offenen Strecken bereits heute über einen hohen, einheitlichen und risikogerechten technischen Ausrüstungsgrad (vgl. [15]), was die V2I-Kommunikation stark begünstigt. Zudem vereinen sie die besonderen Charakteristiken von Hochleistungsstrassen (siehe oben) in beinahe exemplarischem Masse, sodass anzunehmen ist, dass ihnen mit Blick auf das automatisierte Fahren eine besondere Bedeutung zukommen könnte. Zurzeit lassen sich hinsichtlich der Sicherheit des hoch- und vollautomatisierten Fahrens in Strassentunneln somit die folgenden Fragestellungen: erörtern:

- Eignen sich Tunnel auf Hochleistungsstrassen grundsätzlich für die Einführung des automatisierten Fahrens?
- Stellen sich im Gegensatz zu offenen Strecken besondere Sicherheitsrisiken, wo liegen die Potenziale?
- Reicht die bestehende BSA-Struktur für die Gewährleistung des geforderten Sicherheitsniveaus aus, müssen neue Anlagen integriert werden?
- Inwiefern müssen technische und betriebliche Anforderungen für Strassentunnel aufgrund der zunehmend intelligenten Mobilität adaptiert werden?
- Wodurch zeichnen sich ideale Tunnelobjekte zur Einführung des automatisierten Fahrens aus und wo befinden sich diese im schweizerischen Nationalstrassennetz?

1.3 Hypothese und Ziele des Forschungsprojektes

"Tunnel auf Hochleistungsstrassen sind prädestinierte Infrastrukturen zur Förderung des hoch- und vollautomatisierten Fahrens".

Das vorliegende Forschungsvorhaben soll hierzu nun belastbare Aussagen liefern und das verwandte Forschungspaket des ASTRA [5],[16],[13],[2],[17],[18], ergänzen, indem spezifische Erkenntnisse über Tunnelstrecken erarbeitet werden. Diese wurden in den Analysen bislang nicht berücksichtigt; für das Gesamtsystem der schweizerischen Strasseninfrastruktur sind sie jedoch von grosser Wichtigkeit.

Solange die genaue Wirkungsweise und Konsequenzen des automatisierten Fahrens in Strassentunneln unbekannt bleiben, stellen sie für das ASTRA einen Unsicherheitsfaktor im Umgang mit neuen Verkehrstechnologien dar, mit potenziellen Auswirkungen auf die Tunnelsicherheit. Die Formulierung der Hypothese konzentriert sich auf die Themen «Sicherheit», «Technik» sowie «Betrieb» und verdeutlicht, dass im vorliegenden Forschungsprojekt der Fokus nicht nur auf einzelne Aspekte des automatisierten Fahrens in Tunneln gerichtet, sondern dass dieses grundsätzlich und umfassend analysiert werden soll. Dies ist von grossem Interesse, da Strassentunnel immerhin 12 Prozent des Nationalstrassennetzes ausmachen, im Vergleich zu offenen Strecken besondere Risiken aufweisen und aufgrund der bereits heute einheitlichen und hoch technologisierten Ausrüstung für das automatisierte Fahren besonders interessant erscheinen [19].

Im Kern sind deshalb **auf Basis der Erkenntnisse des verwandten ASTRA-Forschungspakets** die Auswirkungen des hoch- und vollautomatisierten Fahrens in Nationalstrassentunneln zu analysieren und angemessene Empfehlungen zu formulieren. Die folgenden Ziele sind dabei zu erreichen:

- Darlegen des internationalen Stands der Forschung im Fachgebiet und aufzeigen der Lücken, siehe Kapitel 2;
- Spezifizieren der Unterschiede des automatisierten Fahrens auf offener Strecke bzw. im Tunnel und Ermittlung der spezifischen Chancen und Risiken des hoch- und vollautomatisierten Fahrens in Strassentunneln, siehe Abschnitte 2.2 und 2.3;
- Definition der sicherheitstechnischen Anforderungen von Tunnelbetreibern für hoch- und vollautomatisiertes Fahren in Strassentunneln und Erstellung von Kriterien für die Auswahl geeigneter Tunnel für automatisiertes Fahren, Kapitel 3 und 4;
- Ermittlung idealer Streckentypen auf dem Nationalstrassennetz (Tunnelobjekte) zur bevorzugten Förderung des hoch- und vollautomatisierten Fahrens unter Berücksichtigung des aktuellen Sicherheitsniveaus des ASTRA, Kapitel 5.

Das übergeordnete Ziel dieser Studie ist die Schaffung einer **Entscheidungsgrundlage**, um das automatisierte Fahren in Nationalstrassentunneln in **technischer und betrieblicher Hinsicht** unter Berücksichtigung der **Tunnelsicherheitsvorgaben** zu ermöglichen.

1.3.1 Abgrenzung

Das vorliegende Forschungsprojekt stützt sich auf die Resultate des ASTRA-Forschungspakets «Auswirkungen des automatisierten Fahrens». Die darin analysierten Problemstellungen und Erkenntnisse werden als Grundlage verwendet und nicht explizit hinterfragt. Dies betrifft insbesondere Schlussfolgerungen:

- zu Nutzungsszenarien (Teilprojekt 1, vgl. [16]);
- zu verkehrlichen Auswirkungen (Teilprojekt 2, vgl. [13]);
- zum Datenumgang (Teilprojekt 3, vgl. [17]);
- zu neuen Angebotsformen (Teilprojekt 4, vgl. [5]);
- zum Mischverkehr (Teilprojekt 5, vgl. [2]) und zu den räumlichen Auswirkungen (Teilprojekt 6, vgl. des automatisierten Fahrens.[18]).

Fahrzeugseitige Technologien werden auf Basis der vorliegenden Studien vorausgesetzt oder allenfalls antizipiert. Es werden keine weiteren dahingehenden Analysen getätigt oder Prognosen gemacht.

Im Fokus stehen ausschliesslich Auswirkungen, auf die Infrastruktur, des hoch- und vollautomatisierten Fahrens (Automatisierungsstufen 3, 4 und 5, in Strassentunneln). Es werden nur Anforderungen für technische Infrastrukturen (BSA) formuliert und keinerlei tunnelsicherheitsbezogene Empfehlungen für Fahrzeugtechnologien abgeleitet

1.4 Vorgehen

Das Vorgehen gliedert sich in folgende 4 Schritte:

Schritt 1: Stand der Forschung und Technik

Beschreiben des Stands der Forschung anhand einer internationalen Literaturrecherche.

Schritt 2: Anforderungen an Strassentunnel

Erhebung der Kriterien mittels Experten-Workshops und Fragebogen (Eigenschaften der Infrastruktur, insbesondere der BSA, aber auch angepasste Betriebsprozesse).

Schritt 3: Beurteilungskriterien

Herleitung von Beurteilungskriterien für Strassentunnel, welche geeignet sind, um automatisiertes Fahren zu testen. Kriterienkatalog gegliedert nach «Sicherheit», «Technik» und «Betrieb» erstellen.

Schritt 4: Hypothesenüberprüfung und Objektliste

Kriterienkatalog in die Praxis übertragen und ideale Tunnelobjekte auf dem Nationalstrassennetz bestimmen.

2 Stand der Forschung und Technik

Das automatisierte Fahren, das durch fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme (advanced driver assistance system; ADAS), bereits auf öffentlichen Strassen präsent ist, verspricht für die nahe Zukunft höhere Sicherheitsstandards und eine gleichmässige Verkehrsdynamik. Obwohl die meisten Nutzfahrzeuge auf dem Markt ein oder mehrere ADAS-Systeme an Bord haben, gibt es kein offizielles Standardisierungsverfahren und die Betriebseigenschaften sind für die Fahrer unklar. Darüber hinaus gibt es bei bestimmten Infrastrukturen wie Tunneln ernsthafte Bedenken hinsichtlich der Sicherheit und Effizienz automatisierter Fahrzeuge, die unter solch anspruchsvollen Bedingungen sicher arbeiten können. Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Sicherheit und Effizienz in Tunneln, stellt die neuen Unterschiede im Fahrverhalten durch teil- und vollautomatisierte Fahrzeuge vor und zeigt Risiken und Möglichkeiten auf, die sich auf der Ebene der Forschung und der Politik im Zusammenhang mit dem automatisierten Fahren in Tunneln ergeben.

Schlüsselwörter: Verbundene und automatisierte Fahrzeuge, Tunnel, ADAS, Verkehrssicherheit, Verkehrsleistung, politische Empfehlungen.

Key words: Connected and automated vehicles; tunnels; advanced driver assistance systems; traffic safety; traffic efficiency; policy recommendations

2.1 Einführung

Technologische Fortschritte in der Sensor- und Kommunikationstechnologie führen zu einer noch nie dagewesenen Umwälzung der Verkehrsnetze, die das Interesse der Akteure in Wissenschaft, Industrie und Politik weckt. Es wird erwartet, dass vernetzte und automatisierte Fahrzeuge (Connected Automated Vehicles, CAVs) die Mobilitätsmuster und -verhaltensweisen der Menschen beeinflussen werden. Beispiele hierfür sind Stadtplanung [20], Reisenachfrage [21], Verkehrsmittelwahl [22], öffentlicher Verkehr [23], aber auch Verkehrsdynamik, Energieeffizienz [24], Verkehrssicherheit [25] und Fahrerverhalten [26]. CAVs haben zweifellos das Potenzial, Vorteile für den öffentlichen Strassenverkehr zu bringen [1], aber ihr Betrieb muss für bestimmte Infrastrukturen wie Tunnel weiter geprüft werden [27]. Aufgrund der einzigartigen geografischen Gegebenheiten sind Tunnel in vielen Ländern wie China, Japan, Norwegen und den Alpen, insbesondere in der Schweiz, ein unvermeidlicher Bestandteil der Strassennetze. In Anbetracht des grossen und schnell wachsenden Anteils an Strassentunneln im Schweizer Strassennetz [28], ist es von entscheidender Bedeutung, die Leistung der neuen Fahrzeugtechnologien in Tunneln zu bewerten. Diese Übersichtsarbeit versucht, mehr Licht in dieses Thema zu bringen, wobei der Schwerpunkt auf der aktuellen Situation in der Schweiz liegt.

Die Fahrzeugautomatisierung wird in Nutzfahrzeugen schrittweise durch eine Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) eingeführt, die für die Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs sowie für die Sicherheit und den Komfort des Fahrers verantwortlich sind. So verfügen beispielsweise viele der derzeit verkauften Fahrzeuge über einen Tempomat, der die Längsbewegung des Fahrzeugs bei der gewünschten Geschwindigkeit steuern kann, oder über einen adaptiven Tempomat (Adaptive Cruise Control, ACC), der auch den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug überwachen und regeln kann. Weitere beliebte Systeme, die in dieser Arbeit erörtert werden, sind die automatische Notbremsung (Automated Emergency Braking, AEB), die eine Vollbremsung durchführen kann, um einen Aufprall zu verhindern oder abzumildern, und der Spurhalteassistent (Lane Departure Warning, LDW), der die Position des Fahrzeugs innerhalb der Fahrspur ständig überwacht.

Obwohl viele neue Fahrzeuge mit solchen automatisierten Systemen ausgestattet sind, gibt es in der Fachliteratur unterschiedliche Aussagen über deren Fähigkeit, unter verschiedenen Wetter-, Verkehrs- oder Infrastrukturbedingungen sicher und effizient zu

arbeiten. Tests finden unter nahezu idealen Bedingungen statt und die Leistung ist gut, aber in der realen Welt ist dies nicht immer der Fall. Die Standardisierung ihres Einsatzbereichs und ihrer Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und -effizienz steckt weltweit noch in den Kinderschuhen [29]. Um diese Lücke zu schliessen, wird in dieser Arbeit der bestehende Status quo zum Betrieb hochautomatisierter Fahrzeuge unter Berücksichtigung der Besonderheiten und Charakteristika der Tunnelinfrastruktur im Vergleich zu gewöhnlichen Autobahnen analysiert und die Leistung der gängigsten kommerziellen ADAS-Systeme in Kombination mit anderen Störungen, wie Wetter, Ablenkung des Fahrers usw. überprüft.

Darüber hinaus gibt es in der Literatur zahlreiche Studien, die sich mit den erwarteten Vorteilen der CAV-Technologie befassen, wie z. B. der Verringerung der Heterogenität der Fahrer, der Anwendung dynamischer dezentraler Steuerung, der Erhöhung der Verkehrssicherheit, der Vermeidung von Leistungseinbussen und Stop-and-Go-Wellen und vielem anderen. Bislang waren solche Vorteile mit herkömmlichen, von Menschen gesteuerten Fahrzeugen nicht möglich, und um sie zu erreichen, sind erhebliche technologische und infrastrukturelle Fortschritte erforderlich. Besondere Infrastrukturen wie Tunnel können als Knotenpunkte in zukünftigen Strassennetzen für effiziente CAVs genutzt werden. In dieser Arbeit wird die Rolle analysiert, die Tunnel in diesem Zusammenhang spielen können.

In Abschnitt 2.2 werden der Stand der Sicherheit und Effizienz von Tunneln, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu offenen Strassen sowie die derzeit für die Sicherheitsbewertung verwendeten Instrumente beschrieben. Abschnitt 2.3 befasst sich mit den Betriebseigenschaften hochautomatisierter Fahrzeuge, wobei der Schwerpunkt auf deren Sensoren, Steuerungssystemen und Unterschieden zu menschlichen Fahrern in Tunneln liegt. Schliesslich werden in Abschnitt 2.4 die Auswirkungen intelligenter Fahrzeuge in Tunneln dargestellt, wobei die aktuellen Informationen über den Betrieb von ADAS in Tunneln, Prognosen aus der Literatur über CAVs sowie die zu erwartenden Vorteile auf der Fahrzeug- und Infrastrukturseite analysiert werden. Das Papier schliesst mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und den politischen Empfehlungen.

2.2 Sicherheit und Effizienz in Tunnels

Tunnel sind besondere, halbgeschlossene Infrastrukturelemente, die gebaut werden, um Reisezeiten zu verkürzen, die ökologische Umwelt zu schützen oder die Verkehrseffizienz in Strassennetzen zu verbessern. Sie weisen jedoch auch einzigartige Merkmale auf, da sie explizit oder implizit die Fahrbedingungen für Fahrzeuge verändern, die von einer offenen Strasse ins Tunnel einfahren oder vom Tunnel auf eine offene Strasse ausfahren. In der Literatur konzentrieren sich die meisten Arbeiten auf die betrieblichen Aspekte von AVs und CAVs unabhängig von der Infrastruktur. Es gibt jedoch politische Bedenken hinsichtlich der Möglichkeit, dass die Leistung von ADAS jetzt, oder vollwertigen AVs in der Zukunft, von den Besonderheiten der Strasse abhängen könnte, und daher gibt es erhebliche Anstrengungen des Bundesamts für Strassen, ASTRA, Schweiz [30] für eine entsprechende Untersuchung. Insbesondere in Tunneln herrschen andere Beleuchtungs- und in einigen Fällen auch Wetterbedingungen, in der Regel gibt es niedrigere Geschwindigkeitsbegrenzungen und längere vorgeschriebene Abstände, und bei den Fahrern kommt es oft zu Ängsten. Diese Unterschiede zu offenen Autobahnen lenken die Aufmerksamkeit der Forscher auf die Bewertung ihrer Sicherheit und Effizienz im Vergleich zur offenen Strasse. In diesem Abschnitt wird versucht, die wichtigsten in der Literatur diskutierten Faktoren zusammenzufassen, die sich auf die Sicherheit und Effizienz des menschlichen Fahrers in Tunneln auswirken. Im weiteren Verlauf des Dokuments wird die Relevanz dieser Faktoren auch für hochautomatisierte Fahrzeuge hervorgehoben. Die Ablenkung des Fahrers ist ein sehr beliebtes Thema bei Forschern, die sich mit der Sicherheit in Tunneln befassen. Texteingaben während des Fahrens führt zu visueller, kognitiver und physischer Ablenkung des Fahrers, was insbesondere bei Infrastrukturen, die zusätzliche Aufmerksamkeitsressourcen vom Fahrer erfordern, die Auswirkungen der Ablenkung verstärken und die Fahrsicherheit beeinträchtigen kann [31]. Polizeiberichten zufolge sind die Hauptgründe für Unfälle in Tunneln die Ablenkung oder Müdigkeit des

Fahrers sowie Aspekte im Zusammenhang mit dem Abstand, dem Einhalten der Fahrspur oder dem Überholen [32]. In einer anderen Studie untersuchten die Autoren die Auswirkungen der Beleuchtung in Tunneln auf aufmerksame und visuell abgelenkte Fahrer und zeigten, dass neben der Aufmerksamkeit für die Fahraufgabe auch die Tunnelgestaltung und die Beleuchtung das Verhalten der Fahrer beeinflussen [33]. Die Bedeutung der Aufmerksamkeit eines Fahrers in Tunneln wird in mehreren anderen einschlägigen Arbeiten in der Literatur erwähnt [34]; [35]; [36].

Das Vorhandensein von Lastkraftwagen oder schweren Nutzfahrzeugen im Allgemeinen erhöht das Risiko einer Kollision in Tunneln. Diese Fahrzeugtypen sind anfälliger für starke Seitenwinde [37]; [38], die zu Unfällen in Brücken-Tunnel-Abschnitten führen. Eine andere Studie, die auf Beobachtungen in einem Untersuchungsabschnitt des Hampton Roads Bridge Tunnels (HRBT) in Hampton Roads, VA, basiert, fand heraus, dass der Anteil schwerer Fahrzeuge (Heavy Vehicles, HV) im Verkehrsstrom einen signifikanten Einfluss auf die Pkw- und HV-Fahrten hat [39]. Andere Arbeiten weisen auf den Zusammenhang zwischen der Durchdringungsrate von HVs in Tunneln und der Sicherheit hin [40]; [41]; [35]; [42].

Darüber hinaus unterteilen die meisten Arbeiten in der Literatur, die sich mit Unfällen in Tunneln befassen, die Infrastruktur in Zonen (in der Regel vier Zonen), die ungefähr dem Vorbereich, dem Eingang, dem mittleren Teil und dem Ausgang des Tunnels entsprechen. Die meisten Unfälle scheinen sich am Tunneleingang zu ereignen [43], [44], wo den meisten Studien zufolge die Unfallschwere höher ist [37], [45], [46], [47], [48], [36].

Beleuchtungsbedingungen und Unwetterverhältnisse sind erwartungsgemäss stark mit Unfällen in Tunneln korreliert. Verschiedene Studien in der Literatur analysieren solche Auswirkungen im Hinblick auf die Farbe der Tunnelwände, die Unfähigkeit menschlicher Fahrer, sich beim Übergang von heller zu dunkler Umgebung zu konzentrieren, oder die Auswirkungen von starkem Regen oder Schnee [49], [50], [35], [33], [51].

Schliesslich wird in verschiedenen Arbeiten erwähnt, dass das Unfallrisiko mit dem durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen (Annual Average Daily Traffic, AADT) steigt [40]; [49], [42]. Andere Variablen, die in der Literatur weniger häufig erwähnt werden, aber dennoch als signifikant mit der Sicherheit in Tunneln zusammenhängend identifiziert wurden, sind die Tunnelgeometrie [35], die Vertrautheit des Fahrers mit der Strasse [46] und die Unterscheidung zwischen ein- oder zweispurigen Tunneln [49].

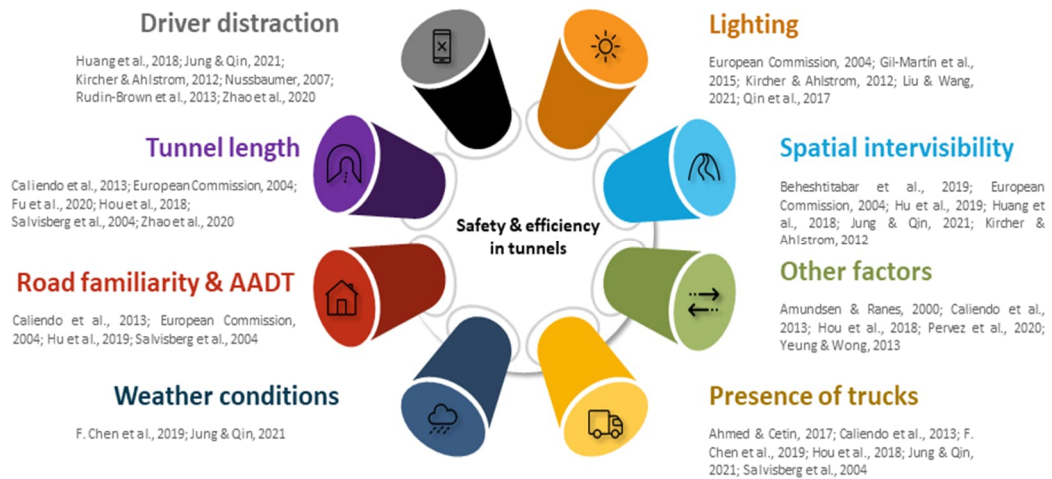


Abb.2 Hauptfaktoren, die mit der Fahrsicherheit und -effizienz in Tunneln zusammenhängen

2.3 Vergleich mit offenen Strassen

Eines der interessantesten EU-Horizon-Projekte zur Bewertung der Tunnelinfrastruktur im Vergleich zu normalen Autobahnverbindungen war das Projekt «Safety Standards for Road Design and Redesign [52], [53]. Aus den Projektergebnissen lässt sich nicht generell schlussfolgern, dass die Sicherheit in Tunneln besser oder schlechter ist als auf offenen Strassen.

Viele andere aktuelle Arbeiten kommen jedoch zu eindeutigeren Ergebnissen. Die Analyse der verfügbaren, der Polizei gemeldeten Unfalldaten für deutsche Autobahn- und Bundesstrassentunnel ergab, dass die Unfallraten auf Strassen in Tunnel niedriger sind [54]. Ausserdem kam eine Studie zu dem Schluss, dass die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls und die Wahrscheinlichkeit, verletzt zu werden, in Tunneln geringer ist als auf offenen Strassenabschnitten [32]. Es gibt kaum eine Studie, die behauptet, dass Tunnel tatsächlich weniger sicher sind als offene Strassen, aber es gibt einige wenige, die erkennen, dass die Schwere eines Unfalls in einem Tunnel in der Regel höher ist als die Schwere eines Unfalls auf einer offenen Strasse [43], [55]. Darüber hinaus belegt mindestens eine Studie, dass Autofahrer bei der Annäherung an einen Tunnel vorsichtiger sind als sonst, was zu weniger Unfällen führen kann [38].

Andererseits sind die Sicherheitsanforderungen in Tunneln immer strenger, um Unfälle zu vermeiden, da es sich bei Tunneln um halbgeschlossene Umgebungen handelt und ein Unfall in einer solchen Infrastruktur verheerende Folgen für die Unfallbeteiligten, aber auch für andere Verkehrsteilnehmer haben kann, z. B. Atemprobleme aufgrund von Feuer/Rauch in einem Tunnel, Reiseverzögerungen und andere. Von Menschen gesteuerte Fahrzeuge, die sich einer Tunnelinfrastruktur nähern, müssen sich in der Regel an niedrigere Geschwindigkeitsbegrenzungen als auf offenen Strassen halten und einen grösseren Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen einhalten. Diese Massnahme wird aus Sicherheitsgründen durchgesetzt und steht in engem Zusammenhang mit der hohen Unfallschwere, die in Tunneln beobachtet wird. Wie erwartet, verringern niedrigere Geschwindigkeiten und grössere Abstände zwischen den Fahrzeugen die Kapazität der Strasse und führen zu einer Unterauslastung der Infrastruktur [56], [57], [47], [44]. Diese wichtige Feststellung ebnet den Weg für neue Möglichkeiten, die CAVs einbeziehen, um die Netzauslastung auf einem kapazitätsnahen Niveau zu halten, ohne die Sicherheit zu beeinträchtigen, wie später in dieser Arbeit erörtert wird.

Die Arbeit von Bassan fasst das Risiko von Tunneln und deren Unterschied zu offenen Strassen gut zusammen [55]: «Das Risiko eines Unfalls in einem Tunnel ist im Vergleich zu Unfällen auf offener Strasse geringer, aber die Unfallschwere im Tunnel ist höher. Das Katastrophenpotenzial bei einem Tunnelbrand ist höher als bei einem Fahrzeugunfall, auch

wenn Brandunfälle seltener sind als Verkehrsunfälle. Die Unterschiede zwischen Tunneln und offenen Strassen sind in der Regel das Ergebnis von Baukostenerwägungen, Beleuchtung, strukturellen Anforderungen, Auswirkungen auf den Querschnitt, Reibungskoeffizienten und der Reaktionszeit des Fahrers, die an die Tunnelumgebung angepasst sind, der Auswirkung des Lüftungskonzepts auf das Längsgefälle und der Notwendigkeit, neben der Verkehrshülle, dem Gefahrguttransport und der Beschilderung (für die Verkehrs- und Brandschutzführung) zusätzliche Elemente innerhalb der Tunnelhülle zu platzieren».

2.4 Bewertungsinstrumente

Obwohl wir tagtäglich Zeugen von Unfällen unterschiedlicher Schwere auf den Strassenverkehrsnetzen werden, gibt es nur sehr wenige visuelle Aufzeichnungen, die uns helfen können, die Ursachen solcher Unfälle besser zu verstehen. Die Informationen stammen in der Regel aus polizeilichen Aufzeichnungen oder anderen Datenbanken, die in Modelle einfließen, um solidere und konkretere Schlussfolgerungen zu den zugrunde liegenden Ursachen zu ziehen.

Eine in der Literatur übliche Art der empirischen Analyse von Verkehrsunfällen sind statistische Methoden und alternative Modellspezifikationen [58]; [59]; [60]. Die Herausforderung dabei ist, dass die Möglichkeit einer Korrelation zwischen den beobachteten und den unbeobachteten Faktoren besteht, die die Unfallohäufigkeit beeinflussen, was, wenn es nicht richtig untersucht wird, zu Verzerrungen oder inkonsistenten Parameterschätzungen führen kann [61]. Die relativen statistischen Vorteile von Modellen mit korrelierten Zufallsparametern werden in der Literatur diskutiert [62], [63], [64]; [41], aber die Herausforderung bei der Wahl dieses Modellierungsansatzes angesichts der zugrunde liegenden Heterogenität der Unfalldaten bleibt bestehen. Eine neuere Studie versucht, die empirische Evidenz hinsichtlich der relativen statistischen Leistung von Zählmodellen mit festen Parametern sowie unkorrelierten und korrelierten Zufallsparametern zu belegen [65]. Die Ergebnisse zeigen, dass die korrelierten und die unkorrelierten Zufalls-Parameter-Zählmodelle den Modellen mit festen Parametern statistisch überlegen sind.

Topologisch gesehen haben verschiedene Teile eines Tunnels ein unterschiedliches Risiko für einen Unfall. Mehrere Studien in der Literatur konzentrieren sich auf die Tunnelzonen, um das Sicherheitsrisiko zu quantifizieren. Üblicherweise werden die Tunnel in vier Zonen unterteilt, nämlich kurz vor der Tunneleinfahrt (Zone1), kurz nach der Einfahrt (Zone2), vor dem mittleren Teil (Zone3) und im mittleren Teil (Zone4), was der umgekehrten Nummerierung von der Mitte zum Ausgang des Tunnels entspricht [43], [55], [32], [44]. In einer neueren Studie wird ein analytischer Ansatz mit sechs Zonen vorgeschlagen, der auf den Richtlinien für die Tunnelbeleuchtung basiert, indem die verschiedenen Zonen (Zugang, Einfahrt, Übergang, Mitte, Ausfahrt und ausserhalb nach Ausfahrt) für die Sicherheitsanalyse von Autobahntunneln getrennt betrachtet werden. Eine unabhängige Analyse wird auch für kurze, mittlere und lange Tunnel durchgeführt [48]. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sechs-Zonen-Methode die herkömmliche Vier-Zonen-Methode übertrifft und ein besseres Verständnis der Unfallrate, der Unfalltypen und der beitragenden Unfallfaktoren ermöglicht.

In der Literatur werden verschiedene Modellierungsansätze erörtert. Die Klassifizierungs- und Regressionsbaum-Methode (Classification And Regression Tree, CART) ist ein Modell zur Behandlung von Wechselwirkungen höherer Ordnungen zwischen erklärenden Variablen [34]. Das bivariate negative Binomialregressionsmodell, das gemeinsam auf nicht schwere Unfälle (nur Unfälle mit Sachschäden) und schwere Unfälle (nur Unfälle mit Toten und Verletzten) angewendet wurde, wurde zur Modellierung der Häufigkeit des Unfallgeschehens verwendet [40]. Das systemtheoretische Unfall- und Prozessmodell (Systems-Theoretic Accident Model and Processes, STAMP) wurde für die Sicherheitsbewertung von Strassentunneln eingeführt [66].

Schliesslich wurden Simulatoren bereits vor mehr als 20 Jahren als Sicherheitsbewertungsinstrument für die Sicherheit in Tunneln eingeführt. In einer viel

zitierten Arbeit validierten die Autoren das Fahrverhalten in einem simulierten Strassentunnel. Die Geschwindigkeit und die seitliche Position von 20 Probanden wurden in einem realen Tunnel und im gleichen Tunnel jedoch im VTI-Fahrsimulator implementiert gemessen [67]. Die relative Validität des Verhaltens zwischen dem Simulator und der realen Situation war sowohl für die Geschwindigkeit als auch für die Seitenlage gut. Es folgten weitere simulationsbasierte Ansätze, und diese Art der Bewertung scheint vielversprechender zu sein, da die technologischen Fortschritte in den letzten Jahren erheblich sind [68], [69].

2.5 Verständnis der wichtigsten Betriebseigenschaften von hochautomatisierten Fahrzeugen

Es wird erwartet, dass hoch- und vollautomatisiertes Fahren zu einem Umbruch in den heutigen Strassenverkehrssystemen führen wird [70]. Die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge werden umfassend in verschiedenen Bereichen untersucht: Verkehrssicherheit [71] und Verkehrseffizienz [26]; Fahrdynamik [72]; Reglerdynamik [29]; Energieverbrauch [73], Modellierungsansätze [74], und Planung [75].

Es ist jedoch anzumerken, dass Fahrzeugautomatisierung und Fahrzeugkonnektivität nicht auf binäre Weise (entweder/oder) betrachtet werden sollten. Es gibt verschiedene Automatisierungs- und Kommunikationsniveaus, die nach und nach im öffentlichen Strassenverkehr eingesetzt werden. Folglich ist mit einer Periode gemischter Verkehrsbedingungen zu rechnen, in der menschliche Fahrer, teilautomatisierte Fahrzeuge und in Zukunft vollautomatisierte Fahrzeuge und Fahrzeuge mit Kommunikationsfähigkeiten, d. h. Fahrzeug-zu-Fahrzeug, Fahrzeug-zu-Infrastruktur und Fahrzeug-zu-Alles, beteiligt sind. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Automatisierungs- und Kommunikationsstufen erläutert, wie sie derzeit von der Society of Automotive Engineers (SAE) definiert werden.

2.6 Automatisierungsgrad und Klassen der Zusammenarbeit

In der Literatur wird die Automatisierungs- oder Konnektivitätsfähigkeit von Fahrzeugen oft binär behandelt, d. h. mit oder ohne, während man davon ausgeht, dass in Wirklichkeit beides schrittweise eingeführt wird. Es wird erwartet, dass autonome Fahrzeuge verschiedene heterogene und in manchen Fällen widersprüchliche Systeme verwenden, die in einem einheitlichen Autopilot-Rahmen zusammenarbeiten können. Derzeit sind viele Nutzfahrzeuge mit einem ACC-System ausgestattet, das die Längsbewegung des Fahrzeugs regelt, ohne dass ein menschlicher Eingriff während der Fahrt erforderlich ist [76]. Gleichzeitig ist das kooperative ACC (Cooperative-ACC) im Versuchsstadium, und derzeit gibt es Fahrzeuge, die in der Lage sind, individuelle Eigenschaften wie Position und Geschwindigkeit an benachbarte Verkehrsteilnehmer zu übermitteln. Folglich erwarten wir eine Übergangsphase, in der einige dieser Technologien nebeneinander bestehen werden. In dieser Zeit ist es für politische Entscheidungsträger, Forscher und die Industrie unerlässlich, die sich daraus ergebenden Risiken und Vorteile zu verstehen und einen "Trail-and-Error"-Ansatz zu vermeiden. In diesem Abschnitt wird das bestehende gemeinsame Verständnis über den Grad der Automatisierung und den Grad der Zusammenarbeit dargestellt.

Die Society of Automotive Engineers [77] hat eine branchenübliche Skala von null (L0) bis fünf (L5) wie folgt entwickelt:

Stufe 0: Keine Automatisierung; der Fahrer ist für die Steuerung des Fahrzeugs vollständig verantwortlich. Diese Stufe umfasst unterstützende Systeme wie Toter-Winkel-Warnung, Kollisionswarnung oder automatische Notbremsung.

Stufe 1: Die Systeme übernehmen die Kontrolle über bestimmte Aufgaben des Fahrzeugs; zu dieser Stufe gehören Systeme wie der adaptive Tempomat (ACC).

Stufe 2: Diese Automatisierungsstufe erfordert das Vorhandensein komplexer Systeme, die sowohl für die Quer- als auch für die Längsregelung des Fahrzeugs zuständig sind.

Stufe 2+: Dies ist keine offiziell anerkannte Automatisierungsstufe, umfasst aber Komponenten von Systemen wie dem berühmten Autopiloten von Tesla, der zwar tatsächlich fährt, aber der menschliche Fahrer sollte jederzeit anwesend und aufmerksam sein. Automobilhersteller nutzen teilweise die Stufe **2++** zur Beschreibung der Fähigkeiten ihrer Fahrzeuge, damit sie die Funktionalität testen können, ohne die Verantwortung tragen zu müssen.

Stufe 3: Diese Stufe bezieht sich auf die bedingte Automatisierung, d. h. der Fahrer kann sich von der Fahraufgabe abkoppeln und sich anderen Tätigkeiten wie dem Lesen widmen, ist jedoch stets bereit, das Fahrzeug auf Wunsch zu übernehmen. Ausserdem steht die bedingte Automatisierung dem Fahrer nicht immer zur Verfügung, sondern nur unter bestimmten Umständen, z. B. bei Autobahnfahrten.

Stufe 4: Das autonome Fahrsystem des Fahrzeugs ist für alle Fahrvorgänge verantwortlich, und der Fahrer kann sich auf andere Aufgaben konzentrieren, ohne dass er ständig wachsam sein muss. In extremen Situationen kann das Fahrzeug den Fahrer warnen, um die Kontrolle zu übernehmen, aber wenn keine Reaktion erfolgt, sollte es sicher zum Stillstand kommen. Zu dieser Kategorie zählen auch die Rayonfahrzeuge ohne Lenkrad und Pedallerie.

Stufe 5: Diese Stufe impliziert eine vollständige Automatisierung, und das Fahrzeug ist in der Lage, die Fahrgäste sicher vom Ausgangspunkt zum Ziel zu bringen. Das Vorhandensein eines Lenkrads ist in dieser Stufe nicht erforderlich.

Vor kurzem hat die SAE den oben genannten Bericht mit einer ähnlichen Klassifizierung hinsichtlich der kooperativen Automatisierung aktualisiert, d. h. der Fähigkeit des Fahrzeugs, mit anderen Fahrzeugen zu fahren und zu kooperieren. Die kooperative Antriebsautomatisierung (CDA) wird wie folgt in fünf Hauptklassen eingeteilt:

Klasse 0: Keine kooperative Automatisierung

Klasse A: Status-Sharing. Das Fahrzeug kann seine Position und seine Umgebung mitteilen, z. B. Bremslichter und Verkehrssignale.

Klasse B: Gemeinsame Absichtserklärung. Das Fahrzeug kann seine Planungsaktivitäten, z. B. Abbiegen oder Zusammenführen, übertragen, um andere Benutzer zu informieren.

Klasse C: Vereinbarungsorientiert. Das Fahrzeug ist in der Lage, zu kommunizieren und die Kommunikation zu verifizieren, um eine Vereinbarung mit anderen Nutzern zu treffen, z. B. bezüglich des Einsparens oder Abbiegens.

Klasse D: Vorschreibend. Das Fahrzeug ist in der Lage, zu kommunizieren, sich mit anderen Benutzern abzustimmen, aber auch Aufforderungen nachzukommen, z. B. von einem Polizeibeamten oder einem Einsatzfahrzeug.

Eine informative Illustration, die die Beziehung zwischen den Klassen der CDA-Zusammenarbeit und dem Automatisierungsgrad zeigt, ist in Abbildung 2 dargestellt.

SAE Driving Automation Levels							
		No Automation	Driving Automation System		Automated Driving System (ADS)		
		Level 0 No Driving Automation (human does all driving)	Level 1 Driver Assistance (longitudinal OR lateral vehicle motion control)	Level 2 Partial Driving Automation (longitudinal AND lateral vehicle motion control)	Level 3 Conditional Driving Automation	Level 4 High Driving Automation	Level 5 Full Driving Automation
CDA Cooperation Classes	No cooperative automation	(e.g., Signage, TCD)	Relies on driver to complete the DDT and to supervise feature performance in real-time		Relies on ADS to perform complete DDT under defined conditions (fallback condition performance varies between levels)		
	Class A: Status-sharing <i>Here I am and what I see</i>	(e.g., Brake Lights, Traffic Signal)	Limited cooperation: Human is driving and must supervise CDA features (and may intervene at any time), and sensing capabilities may be limited compared to C-ADS		C-ADS has full authority to decide actions		Improved C-ADS situational awareness beyond on-board sensing capabilities and increased awareness of C-ADS state by surrounding road users and road operators
	Class B: Intent-sharing <i>This is what I plan to do</i>	(e.g., Turn Signal, Merge)	Limited cooperation (only longitudinal OR lateral intent that may be overridden by human)	Limited cooperation (both longitudinal AND lateral intent that may be overridden by human)	C-ADS has full authority to decide actions		Improved C-ADS situational awareness through increased prediction reliability, and increased awareness of C-ADS plans by surrounding road users and road operators
	Class C: Agreement-seeking <i>Let's do this together</i>	(e.g., Hand Signals, Merge)	N/A	N/A	C-ADS has full authority to decide actions		Improved ability of C-ADS and transportation system to attain mutual goals by accepting or suggesting actions in coordination with surrounding road users and road operators
	Class D: Prescriptive <i>I will do as directed</i>	(e.g., Hand Signals, Lane Assignment by Officials)	N/A	N/A	C-ADS has full authority to decide actions, except for very specific circumstances in which it is designed to accept and adhere to a prescriptive communication		

Abb. 3 Beziehung zwischen Kooperationsklassen und Automatisierungsgraden (SAE, 2021)

2.7 Sensoren in teilautomatisierten Fahrzeugen (alle Stufen)

Um die Auswirkungen von AV's auf die Tunnelinfrastruktur zu verstehen und zu erörtern, analysieren wir zunächst die verschiedenen Arten von Sensoren, die in teilautomatisierten Fahrzeugen vorhanden sind und in zukünftigen AVs vorhanden sein werden.

Die wichtigsten Hardwarekomponenten, die aktiv zur Umgebungswahrnehmung eines AV beitragen, sind Kameras (visuelle Inspektion, Objekterkennung und -segmentierung), LiDARs (Umgebungswahrnehmung), Radare (genaue Entfernungsmessungen), drahtlose Kommunikationsmodule, propriozeptive Sensoren (Global Navigation Satellite Systems-GNSS-Empfänger, Kilometerzähler, Gyroskop und Beschleunigungsmesser) und Aktoren (Fahrzeugsteuerung) [78]. Die Software ist für die Datenfusion, Analyse und Bewegungsplanung des Fahrzeugs verantwortlich.

Bei Video- und Radarsystemen von Fahrzeugen können Probleme auftreten, die durch schwaches Licht, verdeckte Sicht und stark reflektierte Radarwellen, typischerweise in Tunneln auftretend, verursacht werden [79]. Kameras sind anfällig für Witterungseinflüsse, und ihre Leistungsfähigkeit nimmt bei schlechtem Wetter drastisch ab [80]. Wärmebildkameras können die Wahrnehmung des Fahrzeugs bei schlechten Lichtverhältnissen verbessern [81]. LiDARs gelten als robustere Sensoren im Vergleich zu Kameras, sind aber für die Hersteller mit höheren Kosten verbunden. GNSS haben eine geringere Positionsgenauigkeit, und darüber hinaus kann ihre Verfügbarkeit in Tunnelinfrastrukturen beeinträchtigt sein.

In der Literatur finden sich zahlreiche Arbeiten, die sich mit der Verbesserung der Wahrnehmung durch bessere Positionierung, Objekterkennung und Sensorfusion mithilfe von Deep Learning und Methoden der künstlichen Intelligenz befassen. Solche Lösungen können entweder für das Fahrzeug selbst oder auf Infrastrukturebene, unter anderem im Tunnel, eingesetzt werden, z. B. zur Unfallerkennung [82], [83], [84], [79], [85], [86]; [87]; [88].

Da es keine konkreten politischen Vorgaben für die Hersteller gibt, hängen Art, Anzahl und Qualität der bordeigenen Sensoren von der Strategie des jeweiligen Fahrzeugherstellers ab, was eine sorgfältige Prüfung und möglicherweise gesetzgeberische Massnahmen in naher Zukunft erforderlich machen wird. Auch die softwaregestützte Sensordatenfusion und -analyse unterliegt dem Eigentumsrecht (Patentschutz, IP right protection), so dass eine genaue Bewertung derzeit nicht möglich ist

2.8 Fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme

Der Fahrzeugbetrieb auf höheren Stufen wird von Komponenten durchgeführt, die einen oder mehrere Sensoren und die entsprechende Software umfassen können, die Konflikte und Synergien innerhalb der Komponente und zwischen verschiedenen Komponenten (Aktuatoren) bis zur endgültigen beobachteten Fahrzeugbewegung handhabt. Daher ist es wichtig, die bekannten Eigenschaften gängiger ADAS zu erörtern, die derzeit in Nutzfahrzeugen verfügbar sind und als Vorläufer zukünftiger AVs gelten. In diesem Abschnitt werden nur einige kommerzielle ADAS-Systeme vorgestellt, um die Interoperabilität zwischen verschiedenen Sensoren und die Komplexität der Fahraufgabe zu verdeutlichen. Eine erschöpfende Liste von ADAS-Systemen ist nicht Gegenstand dieses Papiers, aber die betrieblichen Vorteile und Einschränkungen für einige der unten genannten Systeme werden später in Übereinstimmung mit der Tunnelinfrastruktur analysiert.

Das wohl bekannteste ADAS ist die adaptive Geschwindigkeitsregelung (Adaptive Cruise Control, ACC), ein System, das für die Längsführung des Fahrzeugs zuständig ist. ACC übernimmt sowohl die Beschleunigung als auch das Bremsen und hält einen vom Fahrer eingestellten zeitlichen Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen ein oder fährt die Fahrzeuge mit einer konstanten (ebenfalls vom Fahrer eingestellten) Sollgeschwindigkeit.

Ein weiteres wichtiges ADAS ist die automatische Notbremsung (Automatic Emergency Braking, AEB), eine Sicherheitsfunktion, die eine Kollision verhindern oder den Aufprall abmildern soll. AEB erkennt über Sensoren Hindernisse vor dem Fahrzeug und warnt den Fahrer zunächst vor einer möglichen Kollision. Reagiert der Fahrer nicht, wird automatisch gebremst.

In Querrichtung warnt der Spurhalteassistent (Lane Departure Warning System, LDW) den Fahrer, wenn er teilweise in eine Fahrspur einfährt, ohne den Blinker zu setzen. Der Spurwechselassistent unterstützt den Fahrer bei der sicheren Durchführung eines Spurwechsels, indem er die Umgebung des Fahrzeugs mit Hilfe von Sensoren abtastet und die toten Winkel des Fahrers überwacht.

Die Festlegung gemeinsamer Standards für ADAS durch alle Hersteller ist eine Notwendigkeit für die nahe Zukunft. Das Fehlen einer vollständigen Standardisierung könnte dazu führen, dass das System für den Fahrer nur schwer verständlich ist, da er glauben könnte, dass sich das Auto wie ein anderes Auto verhält, obwohl dies nicht der Fall ist [89]. Darüber hinaus ändern sich die Namenskonventionen, Tasten und Symbole von Fahrzeug zu Fahrzeug, und darüber hinaus hat jede Implementierung eine Reihe von Betriebsausnahmen für das entsprechende ADAS, die dem Fahrer nicht ordnungsgemäss mitgeteilt werden, was zu Sicherheitsbedenken führt.

2.9 Leistungsbewertung von ADAS in Tunneln

2.9.1 Adaptive Cruise Control / Adaptiver Tempomat

Ein wichtiger Unterscheidungsfaktor zwischen offenen Strassen und Tunneln ist die Beleuchtung. Fahrzeuge, die in Tunnel einfahren, sind bei Tag und bei Nacht mit stark wechselnden Lichtverhältnissen konfrontiert. Eine Analyse der GES-Crash-Datenbank (General Estimates System) aus den Jahren 1997 bis 2005 hat gezeigt, dass die Einflussfaktoren wie unterschiedliche Beleuchtungsszenarien, Wetterbedingungen und Fahrbahnbeschaffenheit für ADAS wie ACC angemessen bewertet werden müssen. Die

Schwere der Verletzungen in ACC-fähigen Fahrzeuge wird mit den von Menschen gesteuerten Fahrzeugen (ohne ACC) verglichen. ACC-fähige Fahrzeuge wiesen eine geringere Verletzungsschwere auf, die meisten keine Verletzungen oder nur leichte Verletzungen. Bei von Menschen gesteuerten Fahrzeugen war die Verletzungsschwere höher [90].

In einer anderen Studie, die die Leistung von Radaren, Sensoren in ACC- und AEB-Systemen, untersucht, sinkt die Erkennungsleistung die Erkennungsgenauigkeit für ein fahrendes Fahrzeug in Tunnelumgebungen aufgrund der diffusen Reflexion von Hochfrequenzsignalen (RF) stark ab [91]. Eine zweite Arbeit, in der die Leistungsverschlechterung dieser Sensoren untersucht wurde, ergab, dass Radar gegenüber Lichtverhältnissen und Niederschlag recht robust zu sein scheint. Im Gegensatz dazu erwies sich LiDAR gegenüber Lichtverhältnissen, Fahrzeugtyp und Niederschlag als relativ robust, aber seine Leistung nimmt ab, wenn die Zielfahrzeuge die Spur wechseln. Bei Kamerasensoren, die für AVs am typischsten sind, tritt der Hauptleistungsverlust bei Beleuchtung und Niederschlag auf, was den Fehler um 50 % erhöhen kann [92]. Darüber hinaus können ADAS bei Tag Kollisionen vermeiden und dadurch die Sicherheit verbessern, aber bei Nacht können die üblichen, auf Videosensoren basierenden Fahrzeugerkennungsalgorithmen nicht verwendet werden, da die meisten modernen Merkmale, wie Schatten, Symmetrie und andere, nicht gemessen werden können [93].

Die Spezifikationen kommerziell eingesetzter Systeme weisen in eine ähnliche Richtung. Mercedes DRIVE Operational Design Domain berücksichtigt explizit Tunnels und ist durch solche Umgebungen eingeschränkt. Weitere Einschränkungen können durch starken Regen, Schneesturm, starken Nebel, ungünstige Verkehrsbedingungen oder temporäre Baustellen entstehen [94].

Auf der Seite der Fahrerwahrnehmung kann ACC die Fahrsicherheit beeinträchtigen, wenn die Fahrer nicht verstehen, wie ACC funktioniert, was darauf hindeutet, dass die Fahrer über die Möglichkeiten dieser Technologie informiert werden müssen [95].

2.9.2 Automatic Emergency Braking / Automatische Notbremsung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts des Bundesamtes für Strassen ASTRA wurden Experimente zur Bewertung kommerzieller AEB-Systeme durchgeführt. Die AEB-Systeme wurden am CARISSMA-Institut für automatisiertes Fahren (C-IAD) unter verschiedenen Wetter- und Lichtbedingungen getestet. Daraus ergeben sich Szenarien mit optimalen, suboptimalen und schlechten Bedingungen. Bei den Best-Case-Szenarien wurden möglichst günstige, optimistische Situationen angenommen (gute Sicht am Tag und klares Wetter). In den Worst-Case-Szenarien wurden die Systeme unter besonders ungünstigen Wetter- und Lichtbedingungen (Dunkelheit und Regen) getestet. Die Systeme der mittleren Szenarien wurden bei Dämmerung in Kombination mit Regen oder Nebel oder bei Nacht mit Nieselregen getestet. Die Testergebnisse zeigen auf höherem Automatisierungs-Level, dass die Systemfunktionalität abnimmt, je komplexer die Testumgebung wird. Schon bei kleinen Abweichungen von den standardisierten Testszenarien nach EuroNCAP konnten die AEB-Systeme den Dummy nicht mehr erkennen oder das Fahrzeug nicht mehr rechtzeitig anhalten. Zusammenfassend bestätigen die Testergebnisse, dass die Verkehrssicherheit durch den automatischen Notbremsassistenten deutlich verbessert werden kann. Allerdings sind die Systeme nicht für alle Situationen ausreichend ausgereift und ihre Funktionalität und Leistungsfähigkeit kann bereits bei geringen Abweichungen vom Basisszenario deutlich sinken [96].

In einem Beitrag über AEB wird erörtert, dass kommerzielle Radarsysteme sowohl Fahrzeuge als auch Strasseninfrastrukturen wie Leitplanken und Tunnel erkennen, während sie im Allgemeinen nicht zwischen Fahrzeugen und anderen Objekten unterscheiden können. Ausserdem ist die Genauigkeit des Radars nur in Längsrichtung hoch, während sie in Querrichtung abnimmt. Diese Eigenschaften des Radars können zu einer falschen Erkennung eines Primärfahrzeugs führen, d. h. des nächsten vorausfahrenden Fahrzeugs auf derselben Fahrspur, was zu einer falschen Auslösung einer automatischen Notbremsung führt [97].

2.9.3 Lane Departure Warning / Spurverlassen Warnung

Die Leistung eines LDW-Systems kann dessen Fähigkeit, Unfälle zu reduzieren, stark beeinflussen, wenn es richtig funktioniert. Trotz dieses Beitrags zur Verbesserung der Verkehrssicherheit gibt es keine umfassende Definition und keine experimentelle Methodik für die Bewertung des Systems. Das Europäische Programm zur Bewertung von Neufahrzeugen (EuroNCAP) umfasst seit 2015 auch Tests zum Spurhaltevermögen (ohne offizielle gesetzliche Verpflichtung für Personenkraftwagen). In einer interessanten Studie der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission wurde eine Methodik zur Bewertung der Robustheit von Spurführungssystemen in derzeit auf dem Markt befindlichen Fahrzeugen entwickelt [98]. Die Versuchskampagnen ergaben einige Probleme mit der Interpretation von abweichenden Markierungen und den Versuchsbedingungen auf kurvigen Strassen. Für beide getesteten Fahrzeuge wurden fehlende Warnungen festgestellt

2.10 Leistungsbewertung von CAVs unter den derzeitigen Annahmen

Laut einem von MOSEN durchgeführten Bericht können innovative Fahrzeuge erhebliche Risiken für Verkehrsteilnehmer darstellen, insbesondere in Tunneln. Diese Risiken sollten den Herstellern, Konstrukteuren, Tunnelbesitzern und -betreibern sowie der Feuerwehr in geeigneter Weise mitgeteilt werden. Das Hauptproblem besteht darin, dass die eingeschränkte Geometrie in Tunneln zu Kollisionen mit den Tunnelwänden aufgrund falscher Lenkung oder seitlicher Abweichung führen kann. Drahtlos Funkkanäle können im Tunnel gedämpft werden, was zu einem Verlust der Signalstärke führt, zusätzlich kann die GNSS-Kommunikation gestört werden. Das Hauptrisiko in dieser Studie mit CAVs liegt in der Definition des ordnungsgemässen Betriebs im Brandfall und der Tatsache, dass die Fahrzeuge nicht mit Rauchsensoren ausgestattet sind [99]. Solche Einschränkungen könnten auch für andere Situationen gelten, wenn CAVs in speziell dafür vorgesehenen Bereichen anhalten müssen [100].

Darüber hinaus unterscheidet eine interessante Studie CAVs von ADAS wie ACC, da der Fahrer eines hochautomatisierten Fahrzeugs die Möglichkeit hat, seine Aufmerksamkeit auf Gedeih und Verderb auf sekundäre Aufgaben zu lenken, während ein ACC-Fahrer weiterhin auf die Fahrbahn achten muss [101].

Verbesserte Fahrbahnmarkierungen, elektronisch lesbare Schilder und drahtlose Repeater in Tunneln für den Internetzugang könnten erforderlich sein, um die Sicherheit des Fahrens in solchen Umgebungen zu gewährleisten [80].

2.11 Mögliche Vorteile von CAVs und dem Tunnelbau

In der Literatur sind Lösungen für die oben genannten Probleme zu finden, und es werden mehrere Vorteile für CAVs hinsichtlich Infrastrukturen wie Tunnel erwartet. Es wird damit gerechnet, dass die Kommunikationsfähigkeiten künftiger Fahrzeuge den grössten Nutzen in Bezug auf Sicherheit und Effizienz bringen. Ein hoher Verbreitungsgrad von CAVs kann Fahrzeugverspätungen reduzieren und die Kapazität erhöhen, vor allem aufgrund der V2V- und V2I-Konnektivität (Jeong, 2021). V2V und V2I können auch bei katastrophalen Ereignissen in Tunneln wie Bränden helfen [99].

Die Bedeutung einer korrekten Fahrspurerkennung für Systeme wie LDW wird ebenfalls hervorgehoben [102]. Die Autoren stellen das Fehlen eines umfassenden Regelwerks für fahrerlose Fahrzeuge fest und schlagen eine kommunikationsbasierte Lösung vor. Die Simulationsergebnisse mit realen Daten zeigen Spurhaltequoten von 95,3 % in Tunneln bzw. 95,2 % auf Autobahnen.

Derzeit kann die eingeschränkte Geometrie von Tunneln in städtischen Gebieten die Fähigkeit der Fahrer beeinträchtigen, den vorausfahrenden Verkehr zu beobachten. Die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen kann daher den Vorausschau-Abstand für die Fahrzeuge erhöhen, und folglich könnten CAVs die Geschwindigkeiten und Trajektorien

der vorausfahrenden Fahrzeuge überwachen und diese Informationen an die dahinterfahrenden Fahrzeuge weitergeben [103].

Schliesslich ist die Kombination von ACC und einer variablen Geschwindigkeitsbegrenzung vielversprechend, um die Sicherheit auf überlasteten Autobahnen, zu denen auch Tunnel gehören, zu verbessern [104].

Tunnel können eine wichtige Rolle bei der Information der Fahrer im Hinblick auf die Betriebsbeschränkungen von ACC-Systemen spielen. ACC können nämlich unter extremen Wetterbedingungen ausfallen. Tunnel können dazu beitragen, den Fahrern solche Informationen zur Verfügung zu stellen. In einer Studie wurde ökologisches Schnittstellendesign (Ecological interface Design, EID) angewandt, um eine visuelle Darstellung des ACC-Verhaltens zu schaffen, die angemessene Zuverlässigkeit fördern und effektive Übergänge zwischen manueller und ACC-Steuerung unterstützen soll [95].

In ähnlicher Weise können Tunnel als Informationsdreh Scheiben für Autofahrer genutzt werden. Wenn sie mit intelligenten Verkehrssystemen ausgestattet sind, können sie unter normalen Bedingungen Fahrhilfen und in Notfallsituationen relevante Informationen für den Fahrer bereitstellen [105]. Darüber hinaus können Tunnel als vernetzte Fahrzeugumgebung zur Geschwindigkeitsanpassung vor der Einfahrt in einen Tunnel [57], sowie zur Verbesserung des Fahrverhaltens und der Verkehrskapazität dienen [56].

Damit jedoch die Konnektivität von Fahrzeugen nutzbar gemacht werden kann, muss zuerst festgelegt werden, auf welchem Standard kommuniziert wird. Zum Zeitpunkt des Schreibens dieses Berichtes bestehen 2 Lager, VW nutzt WLAN, die übrigen Hersteller wie Daimler Benz oder BMW favorisieren und nutzen 5G. Die einzelnen Standards sind für sich selber normiert, aber die Entscheidung welcher Standard auf den Strassen gelten soll ist nicht getroffen worden. Vermutlich werden beide Standards parallel genutzt werden, oder einer der beiden Standards wird zum sogenannten Industriestandard (durch die normative Kraft des Faktischen). Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur ist zurzeit noch nicht geregelt, weil die UNECE Norm sich mit Fahrzeug-, nicht aber mit Kommunikationsnormen befasst [106]

2.12 Schlussfolgerung

Selbstfahrende intelligente Fahrzeuge bringen ein neues Fahrverhalten in die Strassenverkehrssysteme ein, welches die Verkehrsnetze, wie wir sie heute kennen, umgestalten wird. Neue Personenkraftwagen sind bereits mit ADAS ausgestattet, die in der Lage sind, komplette Fahraufgaben wie Längs- und Querbewegungen des Fahrzeugs zu übernehmen. Bislang gibt es jedoch keine Normung der Betriebseigenschaften solcher Systeme, was Bedenken hinsichtlich ihrer Sicherheit und der Auswirkungen auf den Verkehr in naher Zukunft aufkommen lässt. Die erste Norm zum Automatisierten Fahren ist die UNECE Regelung 157 [107], welche neu auf Autobahnen eine Geschwindigkeit bis 130 km/h zulässt. Der frühere Stauassistent war nur bis 60 km/h zugelassen. Ausserdem ist noch unklar, wie sich automatisierte Fahrzeuge in bestimmten Infrastrukturen wie Tunneln und unter nicht idealen Bedingungen in Bezug auf Wetter, Beleuchtung, Strassenmaterial usw. verhalten werden. In diesem Beitrag wurde versucht, durch eine eingehende Analyse der Literatur mehr Licht in das oben genannte Thema zu bringen.

Gegenwärtig wird die Fahrsicherheit und -effizienz in Tunneln hauptsächlich mit der Ablenkung des Fahrers, der Beleuchtung, der Tunnellänge, der räumlichen Sichtbarkeit des Tunnels, der Vertrautheit mit der Strasse und der AADT (Annual Average Daily Traffic), dem Vorhandensein von Schwerlastfahrzeugen wie Lkw und den Wetterbedingungen in Verbindung gebracht. Die Auswertung von Unfalldaten und -berichten in einer solchen Infrastruktur erfolgt durch Simulation, parametrisierte Modelle und statistische Analysen.

Die Tatsache, dass die Verbreitung hochautomatisierter Fahrzeuge auf öffentlichen Strassen noch gering ist und nur wenige Daten vorliegen, stellt eine grosse Herausforderung für das Verständnis der Auswirkungen solcher Fahrzeuge in Tunneln dar. Die gängigsten Sensoren, die heute für das automatisierte Fahren eingesetzt werden,

nämlich Videokameras, LiDARs und Radare, weisen unter realen (nicht idealen) Fahrbedingungen in bestimmten Infrastrukturen einen bedenklichen Leistungsabfall auf (sogar unter 50 %). Die ersten massgeschneiderten Testverfahren für ADAS wie ACC, AEB und LDW bestätigen die oben genannten Erkenntnisse. Folglich sind in Zukunft Standardisierungsverfahren und Tests unter Randbedingungen zu erwarten, um den ordnungsgemässen Betrieb von autonom fahrenden Fahrzeugen in Bezug auf Sicherheit und Effizienz zu gewährleisten. Besonderes Augenmerk sollte auf den Betriebsprotokollen von CAVs während oder/und nach einem Unfall in Tunneln, z.B. im Brandfall, liegen.

Das Fazit zum Stand der Forschung scheint klar: Es genügt nicht das Fahrverhalten von selbstfahrenden Fahrzeugen am Computer zu simulieren und zu warten, oder sich nur auf die Unfallstatistiken aus der Vergangenheit zu verlassen. Der Umstand, dass die gegenwärtig verfügbaren Fahrzeugsensoren, unter verschiedenen Umweltbedingungen zum Teil beträchtliche Leistungseinbussen aufweisen, verlangt nach standardisierten Testbedingungen. Die Fachwelt scheint sich einig zu sein, dass Tunnel des Nationalstrassennetzes im Vergleich zu offenen Strecken eher sicherer sind. Neben dem Umstand, dass Tunnel hinsichtlich Cyberrisiken wohl sicherer sind als offene Strecken, weil der Zugriff für Hacker erschwert ist, kommt hinzu, dass innerhalb von Tunnel die Umweltbedingungen konstanter scheinen, was die Funktion der Sensorik positiv beeinflussen sollte. Auf der negativen Seite ist weiterhin unklar, welche Beschaffenheit der Tunnelwände zu Reflexionen führen und unter welchen Umständen die verschiedenen Sensoren Leistungseinbussen aufweisen. Klarheit schaffen wohl nur Test unter realen Bedingungen. Sinnvollerweise werden derartige Tests zuerst auf abgesperrten Strecken durchgeführt. In der Gewissheit, dass wir in den kommenden 10-30 Jahren Mischverkehr auf unseren Strassen antreffen werden, brauchen wir experimentelle Daten zum Verhalten von automatisierten Fahrzeugen im Mischverkehr. Als Teststrecken scheinen sich in der Tat Tunnel anzubieten. Dies ist denn auch der Auslöser für die Suche nach für Teststrecken geeigneten Tunnel und führt in dieser Studie zur Entwicklung von Auswahlkriterien für Tunnel, welche besonders geeignet erscheinen.

Werden Tunnel modernisiert ist sicherlich darauf zu achten, dass automatisierte Fahrzeuge unterstützt werden können. Dabei geht es primär um geeignete Beleuchtungsbedingungen, Unfallerkennungsverfahren, Kommunikationsinfrastrukturen für die Benachrichtigung der Fahrer, klare Leitlinien und Fahrbahnmarkierungen. Von Seiten der AVs insbesondere der CAVs darf erwartet werden, dass die Verkehrssicherheit durch die Übermittlung von Informationen an vorgelagerte Nutzer zu verbessert. Durch V2V und V2I Kommunikation den Vorausschauabstand von Fahrzeugen in gekrümmten Tunneln vergrössert wird, der Verkehrsfluss homogenisiert und die Kapazität erhöht werden kann. Dabei erscheint es wichtig die Nutzer/Fahrer über die Betriebsgrenzen von ADAS wie ACC zu informieren, um die manuelle Steuerung und Kontrollübernahme im Bedarfsfall zu beschleunigen. Auf der Infrastrukturseite schliesslich können Tunnel als Informationsdreh scheiben für die Fahrer genutzt werden, die sowohl in normalen als auch in Notsituationen Hilfestellung leisten und den Verkehr vor Ort steuern und kontrollieren. Wir sind der Meinung, dass sich diese Betriebsgrenzen nur im realen Testumfeld ermitteln lassen.

3 Anforderungen an Strassentunnel

3.1 Methodik

Die Analyse Stand der Wissenschaft hat Forschungslücken im Bereich Funktionalität verschiedener Sensoren unter wechselnden Umweltbedingungen ergeben. Deshalb konnte man für die Festlegung von Kriterien für die Auswahl geeigneter Tunnel nicht auf bestehende Erfahrungswerte aus dem Fahrbetrieb, respektive von realen Tests zurückgreifen. Aus diesen Gründen wurde ein Experten Fragebogen entworfen mit dem Ziel am Ende der Befragung Beurteilungskriterien für geeignete Tunnel herauszufiltern. Die Fragen drehten sich vor allem um die Sicherheitsaspekte (Tunnelsicherheit), vermutete Leistungseinbussen bei Fahrzeugsensorik, Ausbaueigenschaften von Tunnel, sowie Stärken und Schwächen der Tunnel im Hinblick automatisiertes Fahren.

Es resultierte ein Fragebogen mit 32 Fragen und Abschnitten, welcher innerhalb des der Begleitkommission und deren Forschungsnetzwerke verteilt wurde und als Interviewleitfaden diente. Die Experten waren international ausgewählt und hatten folgenden beruflichen Hintergrund: Ingenieur, Ingenieur im Bereich der Tunnelsicherheit, mit den Schwerpunkten (Planung und Dimensionierung von) Tunnellüftung (inkl. Steuerung und Regelung), Löschwasserversorgung, Abwasserpumpstationen, SÜLA (SISTO), sowie der allgemeinen Tunnelsicherheit und der Begutachtung von Tunneln (Tunnelinspektionen), Ingenieur/in mit einigen Kenntnissen in Informatik und im Bereich der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung von, Fachspezialist Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen BSA im ASTRA, Automobilingenieur, Fahrzeug-Sicherheit und Fahrzeug-Mechanik, Softwareentwicklung Flottensteuerung für automatisierte Fahrzeuge, Fachspezialist Betrieb- und Sicherheitsausrüstungen, Elektroingenieur mit Kenntnissen von Nachrichtentechnik und Informatik, Experte Verkehrstelematik, Automobilingenieur, Fachkenntnisse im Bereich Fahrzeugaufbauten, Forschung, Schwerpunkt automatisiertes Fahren, HMI, Unfallprävention, Projektleiter Verkehrstechnik, Elektroingenieur ETH, >20 Jahre in der Branche Mobilität tätig, Wissenschaftler im Bereich Fahrzeugsysteme.

Rücklauf der Fragebogen: 13 Fragebogen wurden retourniert und deren Antworten ausgewertet.

Um eine Übersicht der abgegebenen Antworten zu erstellen und eine einfache, nachvollziehbare Auswahl von Selektionskriterien zu ermöglichen, wurden Sokrateskarten als methodisches Werkzeug herangezogen. Die Karten zeigen die Struktur (Morphologie) eines Beobachtungsobjektes, hier die gesammelten Antworten aus dem Fragebogen, und erlauben eine einfache Analyse und Besprechung der Resultate.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Übersicht mögliche Kriterien und Massnahmenklassen:

Sämtliche Antworten wurden auf einer Seite zusammengefasst und farblich kategorisiert. Die dazu verwendete Sokrateskarte dient als Hilfsmittel zu Visualisierung der Antworten aus den eingereichten und ausgefüllten Fragebögen.

Da die Zuordnung der Kriterien zu Massnahmenklassen nicht immer eindeutig möglich war, erfolgte eine grobe Zuordnung zu einer der drei folgenden Massnahmenklassen:

Orange	Betriebliche (Organisatorisch – O) Massnahmen
Rot	Tunnelsicherheitsbelange (Baulich – B)
Grau	Technische (T) Massnahmen

Auswertung Fragebogen Massnahmenklassen		Verantwortlich: Reto Schneider	
Automatisiertes Fahren in Strassentunnels; Auswahlkriterien		Datum: 18.11.2022 00:00:00	
		Letzte Änderung: 25.04.2023 16:01:25	
		Revision: 21.04.2023 00:00:00	
<p>© THE SOKRATES MAP CONCEPT Ziel ist das Finden von Kriterien für die Auswahl von Strassentunnels, welche sich als Teststrecken für automatisiertes Fahren eignen. Fokus ist immer Automatisiertes Fahren in Tunnels Level 3-5</p>			
<p><input type="checkbox"/> nicht zugeordnet <input type="checkbox"/> Betriebliche Massnahmen (Organisatorisch - O), orange <input type="checkbox"/> Tunnelsicherheitsbelange (Baulich - B), rot <input type="checkbox"/> Technische (T) Massnahmen, grau</p>		<p>Wirkungspakete <input type="checkbox"/> WP1 <input type="checkbox"/> WP3 <input type="checkbox"/> WP5 <input type="checkbox"/> WP2 <input type="checkbox"/> WP4</p>	
1. Eignung von Tunnel positive Eigenschaften	→ stabile Umgebung → Defizienter Raum mit diversen Orientierungsmöglichkeiten → Standardisierte Einrichtung → weniger Lichtschwankungen → weniger Witterungseffekte → kein querender Verkehr Verflechtungen → keine Fussgänger → Offene Strecken sind komplexer		
2. Negative Eigenschaften von Tunnel	→ Tunnellänge → Beleuchtung → Spatial Intervisibility → Beleuchtungswechsel → Witterungsverhältnisse → Gegenverkehr → Zustand der Bodenmarkierungen → Zustand der Wandmarkierungen → Spiegelungen im Eingangsbereich bei Hitze → Einfahrten → kein GPS Signal → im Ereignisfall erschwerte Bedingungen → Verbindung zu back end Datenverarbeitung erschwert → Reflexionen können zu fehlerhaften Sensorergebnissen führen → Tunnels sind generell nicht geeignet für die Einführung → negative Eigenschaften überwiegen → kritischer Portalbereich → fehlende Halbespuren → safe stop könnte zu Auffahrunfällen führen → langsamere Fahrzeuge → negative Folgen sind immer zu gross, keine Tests in Tunnels		
3. Leistungseinbußen Sensoren	→ Sensoren generell wenig beeinflusst → kein GPS, Problem für Auswert Algorith. → Lidar durch Reflexionen gestört → Radar durch Reflexionen gestört → Kondensation an Sensoren → starke Lichtschwankungen neg. für Videokamera		
4. Eigenschaften von Tunnels	→ moderne Tunnel mit frischen Markierungen → grosser Querschnitt mit Standspur (Weitzring ZH) → Richtungsgetrennt, kein Gegenverkehr → gute Beleuchtung und Markierung → guter Kontrast Fahrbahn zu Wand → möglichst gerade → keine Abweigungen und Einfahrten → sauber, geringe Verschmutzung		
5. Eigenschaften von Sensoren	→ Sensoren darf sich von Umweltbedingungen nicht beeinflussen lassen. → Erst Funkt. Sensoren erlauben Tunnels als ODD freizugeben → Lidar vom Tunnel Geometrie, Markierung, Signal, Pos. aller Fz → Abweichungen vom Normalbetrieb müssen beherrscht werden		
6. Sicherheitsrelevante Schwierigkeiten	→ Standortbestimmung im Tunnel → Reaktionen auf unerwartete Ereignisse im Tunnel → Stausituationen, Reflexionen nach Unfällen → Vollbremsung von Topfahrgägen → Sensorstörungen führen zu Vollbremsungen → Schwerege Lichterblin - Reflex gestörte Lokalisierung → Sicherheit gewinnt nicht ersichtlich → Anteil Tunnels gering ODD haben keine wirtschaftl. Einfluss		
7. Erwartete positive Einflüsse	→ Harmonisierung Verkehr → besserer Verkehrsfluss, weniger Stau, bessere Fluidität → Bessere Verkehrslenkung, Ausweichrouten → optimierte Abstände, erhöhte Kapazität, mehr Sicherheit → pos. Effekte nur dann, wenn alle Fz autonom untereinander sind → Kapazität wird sinken weil alle Regeln befolgt werden → Sicherheit, Kapazität, Wirtschaftlichkeit → weniger Auffahrunfälle		
8. Zu beachtende Eigenschaften Tunnelauffahrt	→ Lichtbedingungen, schnelle Adaption notwendig → enger Tunnelraum kann Radar beeinflussen → Schilder warnen Sensoren vor kommandem Tunnel → nass trocken, Taupunkt, Beeinträchtigung von Sensoren → Kurve wird als Wand erkannt → Einschalten Modus 5 info an Fahrer → keine → unerwartetes Verhalten von Fahrern		
9. Zu beachtende Eigenschaften Tunnelsauffahrten	→ Blendeffekte → diffuser Raum, Orientierungsprobleme → Witterungseffekte → Ausschalten Modus 5 Information Fahrer → Unerwartetes Verhalten von Fahrern		
10. Grösste Herausforderungen bei Einführung	→ Gesellschaftliche und Soziale Akzeptanz z.B. auf der Liste → Das Verstehen der Signale der Sensoren → Verkehrssicherheit → Verkehrsfluss → Verkehrsmanagement → Integration Mischverkehr → Sicherheitsprüfungen		
11. Zusätzliche Themen	→ Sicherer Mischverkehr → Experimente → reservierte Fahrspur → Geschwindigkeitslinsen → Überholverbot → mit guter Sensorik können alle Tunnels befahren werden! → Selbsttuning der Massnahmen → Gefühle → Begeisterung und Sicherheit → hochentwickelter Techn. Standard - vertrauen → Gespanntes Interesse → Unsicherheit jederzeit reagieren zu müssen → Komfort bei langen Tunnels → wird künftig normal sein		
12. Beruflicher Hintergrund der Befragten	→ Ingenieur Tunnelsicherheit → Ingenieur Bereich, BSA → Fachpersonal BSA, ASTRA → Automobile, Fz Sicherheit Fz Mechanik → Softwareentwicklung Fahrersteuerung für autonom. Fz → El Ing Nachrichtentechnik Informatik → Experte Verkehrsleitmaske → Fahrzeuging. Fahrzeugbauingenieur		
13. Neue Aspekte	→ Geographische Höhe / Schwere Eis auf Sensoren → welche Testfälle werden gefahren? Stufigkeit → Normbedingungen → abgegrenzter Testbetrieb → Tunnelsteigung z.B. -3% → Testzeitpunkt Jahreszeiten Sommer Winter (Kondensation) → Stautunden → Unfallstatistik		

Abb. 4 Fragebogenauswertung Übersicht mögliche Kriterien und farbliche Gliederung der Massnahmenklassen

3.2.2 Auswahlkriterien und Kriterienklassen:

Felder, welche nicht eingefärbt sind, beinhalten Antworten, aus welchen keine Kriterien bestimmt werden konnten. Die Antworten können aber später helfen, die effektiven Tests sicher durchzuführen. Auch hier wurden sämtliche Antworten wurden auf einer Seite zusammengefasst und farblich kategorisiert. Die dazu verwendete Sokrates-Karte dient als Hilfsmittel zu Visualisierung der Antworten aus den eingereichten und ausgefüllten Fragebögen.

Dunkelgrün	Harte Muss Kriterien für die Tunnelselektion
Hellgrün	Weiche Kann Kriterien für die Tunnelselektion
Gelb	Weiche qualitative Kriterien für die Tunnelselektion
Blau	Kriterien welche sich ums Testumfeld drehen

Auswertung Fragebogen Auswahlkriterien

Automatisiertes Fahren in Strassentunnels; Auswahlkriterien

Verantwortlich: Rolo Schwader
 Datum: 18.11.2022 09:00:00
 Letzte Änderung: 25.04.2023 16:00:24
 Revision: 21.04.2023 09:00:00

THE SOKRATES MAP CONCEPT

Ziel ist das Finden von Kriterien für die Auswahl von Strassentunnels, welche sich als Teststrecken für automatisiertes Fahren eignen.
 (Erlaubt ein automatisiertes Fahren in Tunnels Level 3-5)

Harte Filterkriterien "kann"

weiche, qualitative Kriterien Tunnel

weiche Kriterien nur Info

Testfeldplanung

Wirkungspakete

Blend- und Lichteffekte

WFS

WFS

Leistungsbeibehaltung Sensorik

WFS

1. Eignung von Tunnel positive Eigenschaften	→ stabile Umgebung	→ Defizienter Raum mit diversen Orientierungsmöglichk.	→ Standardisierte Einrichtung	→ weniger Lichtschwankungen	→ weniger Witterungseinflüsse	→ kein querender Verkehr Verflechtungen	→ keine Fussgänger	→ Offene Strecken sind komplexer	→
	→ Tunnellänge	→ Beleuchtung	→ Spatial Intervisibility	→ Beleuchtungswechsel	→ Witterungsverhältnisse	→ Gegenverkehr	→ Zustand der Bodenmarkierungen	→ Zustand der Wandmarkierungen	→
2. Negative Eigenschaften von Tunnel	→ Spiegelungen im Eingangsbereich bei Nebel	→ Einfahren	→ kein GPS Signal	→ im Ereignisfall erschwerte Bedingungen	→ Verbindung zu back end Datenverarbeitung erschwert	→ Reflektionen können zu fehlerhaften Sensordaten führen	→ Tunnel sind generell nicht geeignet für die Einführung	→ negative Eigenschaften überwiegen	→
	→ kritischer Portalbereich	→ fehlende Haltepunkte	→ safe stop könnte zu Auffahrfällen führen	→ Langsamere Fahrzeuge	→ negative Folgen sind schwerer zu gross, keine Tests in Tunneln				→
3. Leistungsbeibehaltung Sensorik	→ Sensoren generell wenig beeinflusst	→ kein GPS, Problem für Auswert Algorith.	→ LIDAR durch Reflektionen gestört	→ Radar durch Reflektionen gestört	→ Kondensation an Sensoren	→ Starke Lichtschwankungen neg. für Videokamera			→
4. Eigenschaften von Tunneln	→ moderne Tunnel mit frischen Markierungen	→ grosser Querschnitt mit Standspur (Westring ZH)	→ Richtungsgeometrie, kein Gegenverkehr Richtungsvorkehrbaum.	→ gute Beleuchtung und Markierung	→ guter Kontrast Fahrbahn zu Wand	→ möglichst gerade	→ keine Abzweigungen und Einfahrten	→ sauber, geringe Verschmutzung	→
5. Eigenschaften von Sensorik	→ Sensorik darf sich von Umweltbedingungen nicht beeinflussen las.	→ Erst funkt. Sensoren erlauben Tunneln als ODD freigegeben	→ Lagebild vom Tunnel Geometrie, Markierung, Signal, Pos. aller Fz	→ Abweichungen vom Normalbetrieb müssen beherrschbar werden					→
6. Sicherheitsrelevante Schwierigkeiten	→ Standortbestimmung im Tunnel	→ Reaktionen auf unerwartete Ereignisse im Tunnel	→ Staualarmen, Reflektionen nach Unfällen	→ Halbvermeidung von Testfragen, Auffahrtskollisionen	→ Sensorabweichungen führen zu Witterungsfragen	→ Schwere Lichterblättn., Reflex, gestörte Lokalisation	→ Sicherheitsergebnis nicht eindeutig	→ Annel Tunneln geräte ODD haben keine wirtschaftl. Einfluss	→
7. Erwartete positive Einflüsse	→ Harmonisierung Verkehr	→ besserer Verkehrsfluss, weniger Stau, bessere Fluidität	→ Bessere Verkehrslenkung, Ausweichrouten	→ optimierte Abstände, erhöhter Kapazität, mehr Sicherheit	→ pos. Effekte nur dann, wenn alle Fz autonom unterwegs sind	→ Kapazität wird stark erhöht alle Regeln bedingt werden	→ Sicherheit, Kapazität, Wirtschaftlichkeit	→ weniger Auffahrfälle	→
8. Zu beachtende Eigenschaften Tunnelnähert	→ Lichtbedingungen, schnelle Adaption notwendig	→ enger Tunnelraum kann Radar beeinflussen	→ Schläder warme Sensoren vor kommenden Tunnel	→ nass trocken, Taupunkt, Bewässerung von Sensoren	→ Kurve wird als Wand erklärt	→ Einschalten Modus 5 Info an Fahrer	→ keine	→ unerwartetes Verhalten von Fahrern	→
9. Zu beachtende Eigenschaften Tunnelnähert	→ Blendeffekte	→ Offizier Raum, Orientierungspunkte	→ Witterungseffekte	→ Ausschalten Modus 5 Information Fahrer	→ unerwartetes Verhalten von Fahrern				→
10. Grösste Herausforderungen bei Einführung	→ Gesellschaftliche und soziale Akzeptanz et auf der Liste	→ Das Verstehen der Signale der Sensoren	→ Verkehrssicherheit	→ Verkehrsfluss	→ Verkehrsmanagement	→ Integration Mischverkehr	→ Sicherheitsprüfungen		→
11. Zusätzliche Themen	→ Sicherer Mischverkehr	→ Experimente	→ reservierte Fahrspur	→ Geschwindigkeitslimiten	→ Überholerbot	→ mit guter Sensorik können alle Tunneln befahren werden	→ Selbstbehaltung der Massen		→
	→ Gefühle	→ Begeisterung und Schamot	→ hochentwickelter Tech-Standard > verwirren	→ Gespanntes Interesse	→ Unsicherheit jederzeit reagieren zu müssen	→ Komfort bei langen Tunneln	→ wird künftig normal sein		→
12. Beruflicher Hintergrund der Befragten	→ Ingenieur Tunnelnähert	→ Ingenieur Bereich, BSA	→ Fachpersonal BSA ASTRA	→ Automobile, Fz Sicherheit Fz Mechanik	→ Softwareentwicklung Robotersysteme für autonom. Fz	→ Etwig Nachrichtentechnik Informatik	→ Experte Verkehrstelematik	→ Fahrzeugbau/bauen	→
	→ Forschung, automat. Fahren, Sicherheit Einführung	→ Pfl. Verkehrstechnik El. Ing. Mobilitasssektor	→ Wissenschaftler Bereich Fahrzeugsysteme						→
13. Neue Aspekte	→ Geographische Nähe, Schwere Eis auf Sensoren	→ weiche Testfälle werden gefahren/ Stadigke	→ Normalbedingungen	→ Halbespinter Teststrecke	→ Tunnelnähert z.B. -36°	→ Testzeitpunkt Jahreszeiten Sommer Winter (Kondensations)	→ Stautunden	→ Unfallstatistik	→
	→ Staubbedingungen								→

Abb. 5 Farbliche Gliederung der Auswahlkriterien für geeignete Tunnel

3.2.3 Positive Eigenschaften von Tunnels

Aus den Antworten lassen sich folgende positive Eigenschaften von Tunnels auflisten, welche sich auf die Sicherheit, die Leistung der Sensoren und oder die geplanten Kapazitäten im Tunnel förderlich auswirken. Die Reihenfolge ist beliebig gewählt und ist keine priorisierte Rangliste:

- Stabile Umgebung, definierter Raum mit Orientierung;
- Standardisierte Einrichtungen;
- Weniger Lichtschwankungen;
- Weniger Wettereinflüsse;
- Kein querender Verkehr;
- Keine Fussgänger;
- Geringere Komplexität im Vergleich zu offenen Strecken;
- 9 von 13 Antwortenden meinen, dass die heutigen Tunnels ohne weitere Massnahmen sichere Teststrecken wären.

3.2.4 Negative Eigenschaften von Tunnels

Aus den Antworten lassen sich folgende negative Eigenschaften von Tunnels auflisten, welche sich nachteilig auf die Sicherheit, die Leistung der Sensoren und oder die geplanten Kapazitäten im Tunnel auswirken. Die Reihenfolge ist beliebig gewählt und ist keine priorisierte Rangliste:

- Tunnellänge;
- Beleuchtung;
- Einsehbarkeit;
- Gegenverkehr;
- Zustand von Wand und Bodenmarkierungen;
- Spiegelungen bei Nässe im Ein- und Ausfahrtbereich;
- Kein GPS-Signal, Ortung fällt weg;
- Reflexionen führen zu Sensorstörungen;
- Erschwerte Intervention im Ereignisfall;
- Fehlende Haltespuren;
- Safe-Stop führt zu Auffahrkollisionen;
- Langsamere Fahrzeuge;
- Regelbefolgung führt zu Kapaziätsabbau;
- Tunnels sind generell ungeeignet, negative Folgen sind zu gross, keine Tests in Tunnels.

3.2.5 Grösste Herausforderungen

Aus den Antworten lassen sich folgende grösste Herausforderungen von Tunnels auflisten, Die Reihenfolge ist beliebig gewählt und ist keine priorisierte Rangliste:

- Gesellschaftliche und soziale Akzeptanz;
- Verstehen der Signale und Funktion der Sensoren;
- Verkehrssicherheit;
- Verkehrsfluss;
- Verkehrsmanagement;
- Integration Mischverkehr;
- Sicherheitsprüfungen.

3.2.6 Erwartete Verbesserungen

Aus den Antworten lassen sich folgende erwartete Verbesserungen von Tunnels auflisten, Die Reihenfolge ist beliebig gewählt und ist keine priorisierte Rangliste:

- Harmonisierung des Verkehrs;
- Besserer Verkehrsfluss, Fluidität;
- Weniger Staus;
- Bessere Verkehrslenkung, Ausweichrouten;
- Optimierte Abstände, höhere Kapazität, mehr Sicherheit;
- Positive Effekte ergeben sich nur dann, wenn alle Fahrzeuge autonom sind.

3.2.7 Neue Aspekte aus der Bearbeitung der Fragebogen und der Workshops

- Die Geographische Lage / Höhe über Meer berücksichtigen, Schnee und Eis auf Sensoren;
- Beim Testen sollte man mit einfachen Testbedingungen starten und darauf die Testbedingungen schrittweise erschweren;
- Was sind Normalbedingungen? Trocken Strasse, gut ausgeleuchtet, klare Linien und Beschriftungen;
- Ist abgesperrter Testbetrieb möglich? Testzeitpunkt, Jahreszeit, Wochentag, Uhrzeit?;
- Bei der Tunnelauswahl sollten auch Staustunden, Verkehrsdichte und Unfallstatistik berücksichtigt werden.

3.2.8 Eigenschaften der Sensorik

Aus den Antworten lassen sich folgende Eigenschaften der Sensorik auflisten. Die Reihenfolge ist beliebig gewählt und ist keine priorisierte Rangliste:

- Die Sensorik muss mit allen Situationen klarkommen;
- Erst funktionierende Sensoren erlauben es Tunnel als ODD freizugeben;
- Abweichungen vom Normalbetrieb müssen beherrscht werden;
- Es muss ein Lagebild vom Tunnel erstellt werden, Geometrie, Markierungen, Signale, Position aller Fahrzeuge.

3.2.9 Leistungseinbussen bei der Sensorik in Tunnels

Aus den Antworten lassen sich folgende Leistungseinbussen bei der Sensorik auflisten. Die Reihenfolge ist beliebig gewählt und ist keine priorisierte Rangliste:

- Sensoren werden generell wenig beeinflusst;
- Reflexionen stören LIDAR und Radar, gestörte Lokalisation;
- Starke Lichtschwankungen beeinflussen Videokamera;
- GPS-Signal fällt weg, Probleme für Auswertalgorithmen;
- Störungen durch Kondensation auf Sensoren.

3.2.10 Sicherheitsrelevante Leistungseinbussen bei der Sensorik in Tunnels

- Standortbestimmung im Tunnel;
- Reaktion auf unerwartete Ereignisse im Tunnel;
- Stausituation und Reflexionen nach Unfällen;
- Vollbremsung von Testfahrzeugen führt zu Auffahrkollisionen;
- Sensorstörungen führen zu Vollbremsungen.

3.2.11 Zusammenfassung der Resultate

Bei der Frage ob sich Tunnels als Teststrecken für hochautomatisiertes Fahren eignen, ergeben sich 2 Antwortcluster: generell ja und generell nein.

Der eine Teil der Experten war klar der Meinung, dass die Technik auf sich allein gestellt in alle auftretenden «Operational Design Domains» (ODD's) sicher funktionieren muss. Der andere Teil war der Meinung, dass es von Seiten Infrastruktur technologische Unterstützung braucht und das Thema Reduktion der Reflexionen bearbeitet werden muss.

Einig waren sich die Experten über den Umstand, dass die Sensortechnik zurzeit noch zu wenig ausgereift zu sein scheint, um autonomes Fahren problemlos zu meistern.

Dieses Ergebnis passt gut zur Zusammenfassung Stand Forschung und Technik. Eine der Schlussfolgerungen bestand darin, dass nicht die Infrastruktur angepasst werden soll, sondern dass die Fahrzeuge mit ihrer Sensorik alle auftretenden Situationen beherrschen müssen. Diese technische Kompetenz der Fahrzeuge liegt aber zum momentanen Zeitpunkt noch nicht in genügendem Masse vor.

4 Beurteilungskriterien

4.1 Kategorien

Für die Auswahl von für automatisiertes Fahren geeigneten Strassentunneln wurden die Kriterien in folgende Kategorien unterteilt:

- Die MUSS-Kriterien sind klar messbar und stellen notwendige Voraussetzungen für einen Tunnel dar, um als geeigneter Tunnel in Frage zu kommen;
- Die KANN-Kriterien sind grundsätzlich messbar und werden bei der Beurteilung und Tunnelauswahl berücksichtigt, stellen aber keine Ausschlusskriterien dar;
- Die weichen Kriterien sind in der Regel qualitativ zu beurteilen. Ihr Einfluss auf die Bewertung und Tunnelauswahl ist derzeit noch weitgehend unbestimmt. Hierzu sind zukünftig weitere Erfahrungen z.B. im Testumfeld zu machen. Die weichen Kriterien werden der Vollständigkeit halber mit in die Betrachtung aufgenommen, befinden sich aber insgesamt ausserhalb des gegenständlichen Forschungsfokus.

Neben den klaren Selektionskriterien ergaben die Untersuchungen gem. den vorangegangenen Kapiteln weitere, wertvolle Informationen, welche dem Testumfeld zuzuordnen sind und künftig in Versuchen und Tests weiter erforscht werden können.

Im Folgenden werden die einzelnen Beurteilungskriterien in den einzelnen Kategorien beschrieben.

4.2 MUSS-Kriterien

Tab. 2 *Musskriterien*

Musskriterien	Bemerkung
Anzahl Tunnelröhren ≥ 2	Aus TUSI-Liste ersichtlich. Im Normalbetrieb kann man davon ausgehen, dass bei ≥ 2 Tunnelröhren auch das Kriterium «kein Gegenverkehr» erfüllt ist
Keine Fussgänger	Für alle Tunnel aus der TUSI-Liste erfüllt
Tunnellänge $>1000\text{m}$	Um den Einflussbereich z.B. der Tunnelportale und Witterung im Innern des Tunnels als mögliche Teststrecke möglichst unter konstanten Bedingungen zu halten.
Kein Gegenverkehr, richtungsgetrennter Verkehr	Risikominderndes Kriterium vor Allem im Hinblick auf einen möglichen Testtunnel unter Normalbetrieb

4.3 KANN-Kriterien

Tab. 3 *Kann-Kriterien*

Kann-Kriterium	Bemerkung
Keine Verflechtungsstrecken im Tunnel (zusätzliche Zufahrten, Abfahrten, Querungen)	Risikominderndes Kriterium vor Allem im Hinblick auf einen möglichen Testtunnel unter Normalbetrieb Text
Mit Standspur / Pannestreifen (durchgehend)	Risikominderndes Kriterium vor Allem im Hinblick auf einen möglichen Testtunnel unter Normalbetrieb. Anhand von Bildmaterial ausgewertet.
Gute Einsehbarkeit / wenig Kurven / möglichst gerader Verlauf	Risikominderndes Kriterium vor Allem im Hinblick auf einen möglichen Testtunnel unter Normalbetrieb. Anhand von Bildmaterial ausgewertet.

4.4 Weiche Kriterien

Die Folgenden weichen Kriterien werden als Beispiele in der Auswahlliste (neben den MUSS- und KANN- Kriterien) ebenfalls bewertet:

Tab. 4 Weiche Kriterien

Weiche Kriterien (in Auswahlliste berücksichtigt)	Bemerkung
Bodenbelag (hell / dunkel)	
Wände (hell / dunkel)	Die Bewertung dieser Kriterien erfolgt im Rahmen des Forschungsprojektes nur qualitativ. Eine Beurteilung im Hinblick auf die Tunnelauswahl ist derzeit nur eingeschränkt möglich und sollte im Rahmen weiterer Forschungsprojekte (Testfahrten) untersucht werden
Markierung (gut / ok / fair)	
Längsneigung (<3%)	Risikominderndes Kriterium vor Allem im Hinblick auf einen möglichen Testtunnel unter Normalbetrieb. Anhand der Tunnelliste und Bildmaterial nicht auswertbar.

4.5 Weitere - weiche Kriterien und Testlaufplanung

Die folgenden Kriterien geben weitergehende Hinweise mit Fokus auf ein mögliches, künftiges Testumfeld und die Testplanung (nicht Gegenstand dieses Forschungsprojektes):

Tab. 5 Weitere - weiche Kriterien und Testlaufplanung

Weitere – weiche Kriterien	Testlaufplanung
Lichtschwankungen	Safe-Stopp, Herausforderung Auffahrunfälle
Beleuchtung,-wechsel	Abweichungen vom Normbetrieb beherrschen
Wetterverhältnisse	Vollbremsung von Testfahrzeugen
Zustand der Boden- und Wandmarkierung	Unerwartete Ereignisse im Tunnel
Spiegelungen im Ein- und Ausfahrtsbereich	Sensorstörungen führen zu sofortiger Vollbremsung
Reflexionen führen zu Fehlern bei LIDAR und Radar	Vollbremsung führt zu Auffahrkollisionen
Langsamere Fahrzeuge	Optimierte Abstände
Kondensation auf Sensoren	Erhöhte Kapazität
Guter, hoher Kontrast von Fahrbahn zur Wand	Mehr Sicherheit
Sauberkeit, geringer Verschmutzungsgrad	Ausschalten von Stufe 5 mit Info an Fahrer
gestörte/erschwerter Lokalisation im Tunnel	Einschalten von Stufe 5 mit Info an Fahrer
	Unerwartetes Verhalten vom Fahrer

5 Hypothesenüberprüfung und Objektliste

5.1 Ermittlung von idealen Tunnelstrecken als Teststrecken für automatisiertes Fahren

5.1.1 Tunneldatenbank

Als Grundlage zu Auswahl der Tunnelkandidaten wurde die sogenannte TUSI (Stand Tunnelsicherheit bezüglich Selbstrettung) Liste herangezogen, welche zuletzt am 30.06.2022 aufdatiert wurde [27]. Diese Liste fasst alle Nationalstrassentunnel zusammen und zeigt den Stand der anstehenden und/oder umgesetzten Arbeiten an den Sicherheitsinstallationen. Die auswertbaren Daten bestehen im Wesentlichen aus der Anzahl Tunnelröhren und deren Länge. Weitere Tunnelcharakteristika sind nicht direkt auswertbar. Um weitere Kriterien wie Beschaffenheit der Tunnelwand, Einsehbarkeit/Krümmung, Einfahr- und Ausfahrzonen, Standspur, Zustand der Tunnel und Bodenmarkierungen anzuwenden, wurden ausgewählte Tunnel aus der TUSI Liste virtuell abgefahren und ihre Verlauf auf Karten überprüft. Das Videomaterial stammt von einer Videodatenbank vom Astra [108].

In diesem Bericht wird der Begriff Tunnel als Synonym für Tunnelanlagen ab 300 m Länge verwendet. Eine Tunnelanlage besteht im einfachsten Fall aus einer einzelnen Tunnelröhre und in komplexeren Fällen aus mehreren Tunnelröhren (evtl. inkl. Verzweigungen und evtl. mit unterschiedlicher Anzahl Spuren)

Für allfällige Sperrungen der Tunnels zu Testzwecken ist das ASTRA zuständig. Kurzfristige Verkehrsüberleitungen liegen in der Kompetenz der Filialen.

5.1.2 Kontaktadressen der Filialen:

Tab. 6 Kontaktadressen der Filialen

Filiale	Anschrift
Filiale 1; Estavayer-le-Lac	Office fédéral des routes (OFROU) Filiale d'Estavayer-le-Lac Place de la Gare 7 CH-1470 Estavayer-le-Lac Tel.: 058 461 87 11 estavayer@astra.admin.ch
Filiale 2; Filiale Thun	Bundesamt für Strassen (ASTRA) Filiale Thun Uttigenstrasse 54 CH-3600 Thun Tel.: 058 468 24 00 Fax: 058 468 25 90 thun@astra.admin.ch
Filiale 1; Estavayer-le-Lac	Office fédéral des routes (OFROU) Filiale d'Estavayer-le-Lac Place de la Gare 7 CH-1470 Estavayer-le-Lac Tel.: 058 461 87 11 estavayer@astra.admin.ch
Filiale 2; Filiale Thun	Bundesamt für Strassen (ASTRA) Filiale Thun Uttigenstrasse 54 CH-3600 Thun Tel.: 058 468 24 00 Fax: 058 468 25 90 thun@astra.admin.ch
Filiale 3; Zofingen	Bundesamt für Strassen (ASTRA) Filiale Zofingen

	Brühlstrasse 3 (Einfahrt Ringier-Areal) CH-4800 Zofingen Tel.: 058 482 75 11 Fax: 058 482 75 90 zofingen@astra.admin.ch
Filiale 4; Filiale Winterthur	Bundesamt für Strassen (ASTRA) Filiale Winterthur Grüzefeldstrasse 41 CH-8404 Winterthur Telefon: 058 480 47 11 Fax: 058 480 47 90 winterthur(at)astra.admin.ch
Filiale 5; Bellinzona	Ufficio federale delle strade (USTRA) Filiale Bellinzona Via C. Pellandini 2a CH-6500 Bellinzona Telefon: 058 469 68 11 Fax: 058 469 68 90 bellinzona@astra.admin.ch

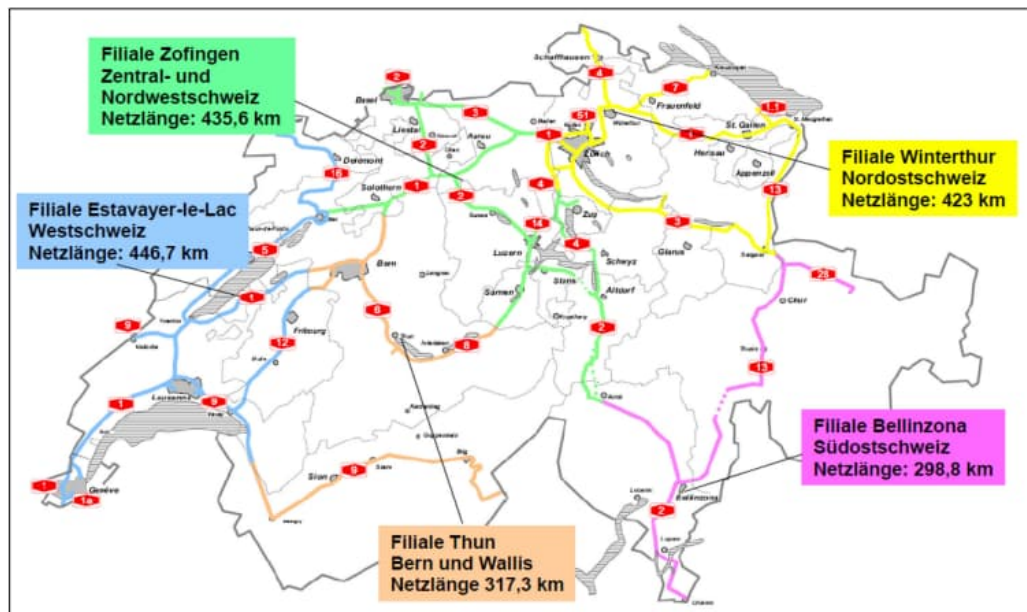


Abb. 6 Filialstandorte und Zuständigkeitsgebiet [109]

5.1.3 Auswahlkriterien

Die Auswahl der Tunnelkandidaten erfolgt anhand der in Kap. 4 aufgeführten Beurteilungskriterien. Im Folgenden wird die Beurteilung anhand einzelner Kriterien näher erläutert.

Die Empfehlung bezüglich der Tunnellänge betrug 1-2 km. Die ersten 300m - 500m sind mit Eintragung von Nässe belastet und danach braucht es eine vernünftig lange, homogene Strecke für Tests. Aus diesen Gründen erscheint eine Grenzlänge von 1-2 km angemessen. Im Rahmen der Auswertung wurden alle Tunnel, die gleich oder länger als 1000m sind und mindestens über 2 Röhren verfügen (MUSS-Kriterien) in die Vorauswahl genommen. In der TUSI-Liste ist jeweils die längste Röhre je Tunnelanlage massgebend für die Länge.

Ausschluss von Tunnel mit Gegenverkehr: Die Angabe 2 Röhren, oder 3 Röhren (Baregg) lässt darauf schliessen, dass im Normalbetrieb kein Gegenverkehr herrscht und es auch keinen querenden Verkehr gibt.

Kriterium Fussgänger und Langsamverkehr: Da es sich um Nationalstrassentunnel handelt sind Fussgänger und Velofahrer/Langsamverkehr ebenfalls ausgeschlossen. Die

Die Punkte Einsehbarkeit, Abzweigungen und Einfahrten, sowie die Tunnellängsneigung von weniger als 3%, lassen sich allein anhand der TUSI-Liste nicht erheben. Ebenso sind zur Beurteilung der Kriterien bezüglich Haltspuren, Pannestreifen, Pannenbuchten, grosser Tunnel-Querschnitt und möglichst gerader Verlauf weitere Auswertehilfen heranzuziehen.

Tab. 7 Muss-; Kann-; Weiche Kriterien zusammengefasst

MUSS-Kriterium	Beurteilung möglich
Anzahl Tunnelröhren ≥ 2	ja, TUSI
Keine Fussgänger	Indirekt, Nationalstrassen sind fussgängerfrei
Tunnellänge >1000m	ja, TUSI
Kein Gegenverkehr, richtungsgetrennter Verkehr	ja, TUSI
Kann-Kriterium	Beurteilung möglich
Keine Verflechtungsstrecken im Tunnel (zusätzliche Zufahrten, Abfahrten, Querungen)	ja, teilweise, 3 D Video ASTRA
Mit Standspur / Pannestreifen (durchgehend)	ja, 3 D Video ASTRA
Gute Einsehbarkeit / wenig Kurven / möglichst gerader Verlauf	ja, 3 D Video ASTRA, inkl. Kartenmaterial
Weiche Kriterien	Beurteilung möglich
Lichtschwankungen	nein
Beleuchtung,-wechsel	nein
Wetterverhältnisse	nein
Zustand der Boden- und Wandmarkierung	ja, teilweise 3D Video ASTRA
Spiegelungen im Ein- und Ausfahrtsbereich	nein
Reflexionen führen zu Fehlern bei LIDAR und Radar	nein
Langsamere Fahrzeuge	nein
Kondensation auf Sensoren	nein
Guter, hoher Kontrast von Fahrbahn zur Wand	ja, teilweise 3D Video ASTRA
Sauberkeit, geringer Verschmutzungsgrad	nein
gestörte/erschwerte Lokalisation im Tunnel	GPS Signal wohl in allen Tunnel nicht vorhanden

Um die ausgewählten Kriterien dennoch möglichst vollständig zu ermitteln, wurden mit Hilfe des Video-Tools vom ASTRA [108] die 53 vorbestimmten Tunnels, welche die MUSS-Kriterien bestanden haben, «abgefahren», auf Kartenausschnitten verifiziert und die Kriterien erfasst, bzw. bewertet.

Das Kriterium Längsneigung konnte im Rahmen der gegebenen Mittel nicht beurteilt werden. Hierzu und auch zur Erfassung umfassender, weiterer Inventardaten, wäre künftig und im Rahmen einer systematischen Datenerfassung der Aufbau einer schweizweiten Tunnel-Inventar-Datenbank zu empfehlen. In der Richtlinie Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen [110] sind «besondere Charakteristika» (siehe Anhang 8.3 und 8.4) aufgeführt. Diese wären grundsätzlich zweckdienlich, lassen sich jedoch, wie erwähnt mit dem vorhanden Datenmaterial nicht vollständig erfassen und auswerten.

Im gleichen Zusammenhang ist auch das Kriterium «Verflechtungen» mit gegebener Datenbasis nicht zu beurteilen, da die Ein-/Ausfahrten sich in der Regel am Anfang und am Ende des Tunnels befinden und teilweise nur über eine kurze Strecke (50-200m) im Tunnel verlaufen und deshalb anhand der Bilddaten in der Regel nicht erfasst sind. Eine

Ausnahme zeigt sich beispielsweise beim Tunnel Schoren (SG), wo es klar eine Abzweigung im Innern des Tunnels gibt.



Abb. 7 Videostandbild aus dem Tunnel Schoren mit Abzweigung im Tunnel

Tunnelkrümmung/Kurvigkeit: Aus Gründen der Tunnelsicherheit weisen fast alle Tunnel leichte Krümmungen im Verlauf auf und meistens befindet sich im mittleren Teil eine längere gerade verlaufende Strecke.

5.1.4 Auswahlmethode

Die Vorauswahl geeigneter Tunnel aus der TUSI-Liste [27] (vgl. Anhang Kap. I.1.1.1III) erfolgt im ersten Schritt anhand der MUSS-Kriterien. Sämtliche Tunnel, die alle MUSS-Kriterien erfüllen und keine zu starke Kurvigkeit (gerade oder sanfte Krümmung) aufweisen, werden mittels der weiteren Kriterien (KANN / Weiche) im zweiten Schritt genauer bewertet. Zur Illustration der jeweiligen Tunnelbewertung wird die Erfüllung der einzelnen Kriterien in einem Ampelsystem gezählt und dargestellt (siehe auch Abb.8):

Tab. 8 Farbcode der Auswahlkriterien

Farbe	Erfüllungsgrad
grün:	Anzahl der als erfüllt bewerteten Kriterien
gelb:	Anzahl der als teilweise erfüllt bewerteten Kriterien
rot:	Anzahl der als nicht erfüllt bewerteten Kriterien
k.A.:	Keine Bewertung auf Basis der Daten

Nr	F	NS Nr.	Kanton	Objektname	Grün	Gelb	Rot	k.A.*
143	3	N03	AG	Bözberg	7	1	1	3

Abb. 8 Prinzip Tunnelbewertung und Auswahl

5.2 Liste ausgewählter Tunnels

Nr.	F	NS Nr.	Kanton	Objekt-name	MUSS		KANN				Weiche Kriterien.				grün	gelb	rot	k.A.*		
					#Röhre(n)	Gegen-Verkehr	Länge >= 1000m	Länge	Fussgänger	Verflechtungen	Mit Standspur	Schlechte Einsehbarkeit /	Bodenbelag	Wände					Markierung	Neigung < 3%
					Stk.	ja / nein	ja / nein	[m]	ja / nein	ja / nein	ja/nein	ja/sanft/ nein	hell/ dunkel	hell/ beton	gut/ok/ fair	ja / nein				
14	1	N16	BE	Moutier	2	n	j	1195	n	n	n	s	d	h	g	k.A.	7	1	1	3
32	1	N01	FR	Combette	2	n	j	1225	n	n	j	s	d	h	g	k.A.	8	1	0	3
36	1	N01	FR/BE	Vignes	2	n	j	2220	n	n	n	s	d	h	g	k.A.	7	1	1	3
40	1	N01	GE	Confignon	2	n	j	1460	n	n	n	s	d	b	o	k.A.	6	2	1	3
56	1	N16	JU	Perche	2	n	j	1050	n	n	n	s	d	h	g	k.A.	7	1	1	3
87	1	N01	VD	Arri-soules	2	n	j	3020	n	n	n	n	d	h	g	k.A.	8	0	1	3
94	1	N09	VD	Glion	2	n	j	1345	n	n	n	s	d	h	g	k.A.	7	1	1	3
101	2	N05	BE	Büttenberg	2	n	j	1500	n	n	n	s	d	b	g	k.A.	7	1	1	3
111	2	N05	BE	Pieterlen	2	n	j	1470	n	n	n	s	d	b	g	k.A.	7	1	1	3
123	2	N09	VS	Eyholz	2	n	j	4260	n	n	n	s	d	h	g	k.A.	7	1	1	3
139	2	N09	VS	St. Maurice	2	n	j	1225	n	n	n	s	h	b	o	k.A.	6	2	1	3
140	2	N09	VS	Turtmann	2	n	j	1360	n	n	n	n	d	h	g	k.A.	8	0	1	3
143	3	N03	AG	Bözberg	2	n	j	3700	n	n	n	s	d	h	g	k.A.	7	1	1	3
144	3	N03	AG	Habsburg	2	n	j	1540	n	n	n	s	d	h	g	k.A.	7	1	1	3
155	3	N02	BL/SO	Belchen	2	n	j	3300	n	n	n	s	h	h	o	k.A.	6	2	1	3
178	3	N05	SO	Birchi	2	n	j	1430	n	n	n	s	d	h	g	k.A.	7	1	1	3
179	3	N05	SO	Grenchner Witi	2	n	j	1760	n	n	n	s	d	h	g	k.A.	7	1	1	3
181	3	N05	SO	Lüsslingen	2	n	j	1230	n	n	n	s	d	h	o	k.A.	6	2	1	3
215	3	N02	UR/NW	Seelisbergtunnel	2	n	j	9280	n	n	n	s	h	h	g	k.A.	7	1	1	3
228	4	N03	SG	Quarten	2	n	j	1040	n	n	n	s	h	h	f	k.A.	6	1	2	3
250	4	N01	ZH	Gubrist	2	n	j	3230	n	n	n	s	h	h	o	k.A.	6	2	1	3
253	4	N04	ZH	Islisberg	2	n	j	5000	n	n	n	n	d	h	g	k.A.	8	0	1	3
306	5	N02	TI	Piumogna	2	n	j	1538	n	n	n	s	d	h	g	k.A.	7	1	1	3

Abb. 9 Tunnel-Auswahlliste – MUSS-Kriterien erfüllt

5.3 Umsetzbarkeit in der Praxis

Als Projektabschluss wurden 4 von 5 Filialen die Bereichsleiter oder Fachspezialisten der Erhaltungsplanung hinsichtlich der Tunnelauswahl und der Machbarkeit von Test in den besagten Tunnels befragt. Dabei ergaben sich folgende wichtige Erkenntnisse.

Die Machbarkeit hängt vor allem von den politischen Rahmenbedingungen und den geographische/verkehrstechnischen Lage ab. Weiter sind die in den nächsten Monaten und Jahren geplanten Wartungs- respektive Umbauarbeiten zu berücksichtigen. Als Beispiel für eine eher schwierige Machbarkeit gilt der Gubristtunnel. Bei diesem wird nächsten die 3. Röhre dem Betrieb übergeben, gleichzeitig erfolgt die Sperrung einer der alten Röhren für die kommenden 3-4 Jahre. Ähnliches gilt für den Büttenberg Tunnel/Umfahrung Biel. Ebenfalls schwierig wäre eine Umleitung beim Piumogna Tunnel in der Leventina, weil allfällige Ausweichrouten über den San Bernadino führen müsste, was eher als unrealistisch angesehen wird. Gleiches gilt für den Eyholz Tunnel, da scheint eine Umleitung/Verlassen der Autobahn bei Visp als unrealistisch. Ebenfalls nicht zu empfehlen sind die Tunnel Confignon in Genf und Glion in Montreux, obwohl diese die Kriterien erfüllen. Confignon ist ein Tunnel für Pendler von Frankreich nach der Schweiz mit sehr viel Verkehr und mehreren anstehenden Sanierungsprojekten. Für den ebenfalls stark befahrenen Tunnel Glion Nähe Montreux sind ebenfalls Sanierungsarbeiten geplant

und eine Umfahrung würde wegen des Chillon Viaduktes sehr weitreichend werden. Als Beispiele für eine realistische Machbarkeit können der Turtmann Tunnel, der Pieterlen Tunnel (geplante Baustelle ab 2017), der Quarten Tunnel aufgeführt werden, sowie die Tunnel Combette, Vignes, Perche und Arrissoules. Diese verfügen mehrheitlich über homogene Tunnelstrukturen, ohne Buchten und weisen eine eher geringe Verkehrsdichte auf. Diese Tunnel sind entweder neu, kürzlich saniert, haben erneuerte BSA, oder es sind keine unmittelbaren Bauarbeiten geplant und eine Umlenkung der einen Tunnelspur auf bidirektionalen Verkehr scheint leicht machbar. Zusätzlich gibt es in Tunnelnähe die Möglichkeit den Mittelstreifen mechanisch zu öffnen, um den Verkehr umzuleiten. Zusätzlich wäre beim Turtmann Tunnel eine Umfahrung via Kantonsstrasse ohne grosse Störungen möglich.

Der Tunnel bei Moutier käme allenfalls auch noch in Frage, er ist verkehrsarm, ohne geplanten Baustellen, ist aber eher schwierig umzuleiten und weist Ausfahrtsbeschilderungen im Tunnel für die Ausfahrt Moutier Nord auf. Ähnliches gilt für den Tunnel bei St. Maurice, bei welchem auf 2024 eine Baustelle auf der angrenzenden Brücke geplant ist.

Alle Fachpersonen betonten die Wichtigkeit den Verkehr so wenig wie möglich zu beeinträchtigen. Gleichzeitig wurde der Bedarf für Teststrecken anerkannt.

Weiter wurde vorgeschlagen die allfälligen Tests in einem verkehrsarmen Zeitfenster von 22:00 bis 04:00 durchzuführen, wobei die Umleitung von 21:00-05:00 installiert werden müsste. Dies ergäbe eine Testdauer von jeweils rund 6 Stunden. Bei allen Gesprächen mit den Unterhaltsexperten auf den Filialen, gab es während des Interviews Rückfragen bezüglich Testdauer und Testkonzept. Diese Fragen konnten jedoch im Rahmen dieses Forschungsprojektes noch nicht beantwortet werden und dürften Teil des weiteren Forschungsbedarfes sein.

Ausserdem wurde darauf hingewiesen, dass in den gesperrten Tunnelröhren der ganze Tunnel zum Testen zur Verfügung stünde. Man könnte die Testfahrzeuge im Tunnel wenden und dadurch bidirektionalen Verkehr simulieren. Weiter gibt es Tunnels mit runden oder rechteckigen Querschnitten, welche wohl unterschiedlich Radarsignal/Reflexionen auslösen werden.

5.3.1 Auswertung der Gespräche mit den Filialen 1,2,4 und 5:

Tab. 8 Auswertung der Gespräche mit den Filialen 1, 2, 4 und 5

Tunnel	gut geeignet	eventuell geeignet	nicht geeignet
Moutier (BE)		x	
Combette (FR)	x		
Vignes (FR/BE)	x		
Confignon (GE)			x
Perche (JU)	x		
Arrissoules (VD)	x		
Glion (VD)			x
Büttenberg (BE)			x
Pieterlen (BE)	x		
Eyholz (VS)			x
St. Maurice (VS)		x	
Turtmann (VS)	x		
Quarten (SG)	x		
Islisberg (ZH)			x
Gubrist Tunnel (ZH)			x
Piumunga Tunnel (TI)			x

In grün sind die speziell geeigneten Tunnels aufgeführt. Es fehlt die Stellungnahme zu den Tunnels, welche von Filiale 3 betreut werden. Dort war die Auskunft, dass es allein dem ASTRA obliegt Tunnels als geeignet oder nicht geeignet einzustufen.

5.4 Weiterer Forschungsbedarf

Die Analyse Stand der Forschung und Technik (Kapitel 2) hat aufgezeigt, dass es noch unklar ist, wie sich automatisierte Fahrzeuge in bestimmten Infrastrukturen wie Tunneln verhalten werden. Computersimulationen genügen nicht um das Fahrverhalten von AV's zu analysieren. Der Umstand, dass die gegenwärtig verfügbaren Fahrzeugsensoren, unter verschiedenen Umweltbedingungen zum Teil beträchtliche Leistungseinbussen aufweisen, verlangt nach standardisierten Testbedingungen, welche in Tunneln vorhanden sind. Weil es jedoch weiterhin unklar ist, welche Beschaffenheit der Tunnelwände zu Reflexionen führen und unter welchen Umständen die verschiedenen Sensoren Leistungseinbussen aufweisen braucht es Tests unter realen Bedingungen. Die Ausarbeitung der Testprotokolle, einer Standardisierten Messmethodik für die Leistung der Sensoren dürften Gegenstand weiter Forschungsprojekt werden.

Erfahrungsgemäss werden die Autohersteller verbesserte Assistenzsysteme in regelmässigen Abständen zuerst im Premium Segment ausrollen, bis diese dann durch Konkurrenzdruck günstiger werden und über die Zeit als Serienstandard zur Verfügung stehen. Hierzu braucht es verfügbare Teststrecken, unter Umständen Teststrecken in Tunneln. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht beurteilbare Kriterien können im Rahmen künftiger Versuche (Testumgebung) weiter analysiert und deren Einfluss auf die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit des automatisierten Fahrens insbesondere im Tunnelumfeld, untersucht werden.

Durchführung von Tests:

Das Projekt liefert eine Liste von potentiellen für Test geeignete Tunnels. Ob in den Tunnels dann Test durchgeführt werden können, liegt in der Verantwortung und dem Ermessen und der Zustimmung des ASTRA in Zusammenarbeit mit der zuständigen Filiale als Betreiber.

Das Forschungsprojekt liefert potentiell geeignete Tunnel. Sicherlich braucht es vor der Planung und Durchführung von Test nochmals eine Betrachtung der Sicherheitsaspekte, der Technischen und praktischen Machbarkeit sowie die Klärung von allenfalls rechtlichen Aspekten. Eine Hilfestellung bieten sicher die unter 5.3. erwähnten Abklärungen für die effektive Auswahl der in Frage kommenden Tunnel.

Insbesondere die in diesem Forschungsprojekt beschriebenen weichen Kriterien sind auf gegebener Datenbasis nur teilweise, oder unzureichend bestimmbar. Hieraus könnte man einen Bedarf für eine systematischen Inventarisierung der Tunnel mit ihren spezifischen Eigenschaften, in einer schweizweiten Datenbank ableiten.

Es ist anzunehmen, dass bei der Planung der Test eine graduelle Erhöhung der Testanforderungen/Testkomplexität angestrebt wird. Sicherlich bieten einige ausgewählte Tunnels ein passendes homogenes Umfeld, um standardisierbare Tests durchzuführen.

Anhänge

I	Auswertung Fragebogen zu Tunneleigenschaften.....	50
II	Gesamte TUSI-Liste / MUSS Kriterien	60
III	Indikatoren aus Risikokonzept	67
IV	Checkliste zur Bestimmung einer besonderen Charakteristik.....	73
V	Fotos aus Videodatenbank	75

I Auswertung Fragebogen zu Tunnelleigenschaften

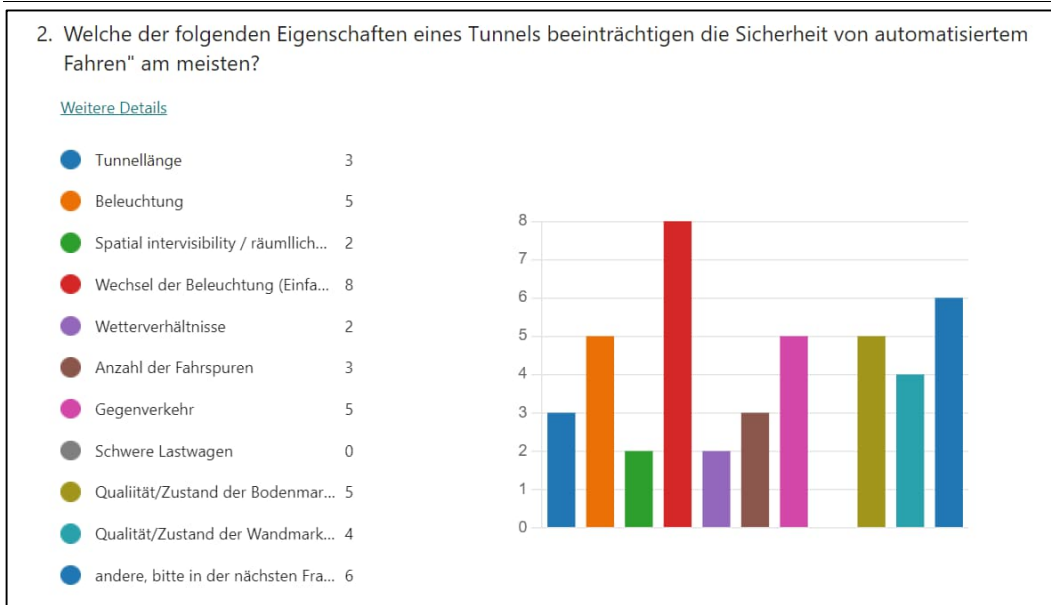
Auswertung Fragebogen (Stand 10.11.2022 13 ausgefüllte Fragebogen):

Frage 1: Eignen sich Tunnels generell für die Einführung von automatisiertem Fahren?

Antworten

- Ja, denn die Umgebung im Tunnel "relativ" stabil bleibt.
- Im Grunde ja, da der Tunnel ein definierter Raum mit zahlreichen Orientierungsmöglichkeiten ist. Diese können sein, Fahrbahnmarkierung, Hochbord, Fluchtwegkennzeichnung, Fluchttüren oder SOS-Nischen, ggf. Beschilderung (auch vor dem Tunnel).
- Ja. Die Umgebung ist bekannt und wenig variabel Français (France)
- Grundsätzlich ja, weil standardisierte Einrichtungen und Markierungen. Achtung aber im Portalbereich bei Nässe, Spiegelungen, etc.
- Nur für einen Teil der AV Anwendung, da die Licht Verhältnisse ziemlich konstant, dafür Reflexionen sehr unregelmässig sein können.
- 6. Tunnels sind spezielle Umgebungen mit verschiedenen potentiellen Vor- und Nachteilen. Die Eignung hängt davon ab, wie gut die Nachteile kompensiert und die Vorteile genutzt werden können. Eine Einführung/Einschaltung des automatisierten Fahrens nur in ausgewählten Tunnel ohne die Fahrt ausserhalb des Tunnels ebenfalls zu automatisieren erscheint mir jedoch nicht zielführend. Vorteile: - Weniger Wettereinflüsse - Lichtverhältnisse steuerbar und konstanter - Ggf. einfachere Installation von helfender Infrastruktur Nachteile: - Grössere Gefahr bei Unfällen (Erreichbarkeit, Evakuierung) - Übergang bei Tunnelein- und -ausfahrt - Kein GPS
- 7. Ja, besonders längere Tunnels. In einem Tunnel sind die äusseren Einflüsse viel geringer, damit wird das automatisierte Fahren einfacher.
- 8. Ja; Geringe Redundanz & Fehlerfreundlichkeit kann durch automatisierte Systeme besser kompensiert werden als durch Menschen.
- 9. Tunnel erscheinen mir sehr gut geeignet: - sehr übersichtliche Umgebung, klare Verhältnisse - keine Fussgänger, Velos - keine Kreuzungen und Querungen - gute, konstante Beleuchtung, kein Witterungseinfluss Allerdings: der Lerneffekt wir sehr klein sein, da Tunnel - wie erwähnt - wenig Herausforderungen stellen
- 10. Ja, kein querender Verkehr, keine Fussgängerstreifen.
- 11. ja, besonders längere Tunnels. In einem Tunnel sind die äusseren Einflüsse viel geringer, damit wird das automatisierte Fahren einfacher.
- 12. Fahrer geben Kontrolle im Tunnel gerne ab, da es ein einfaches Fahren ist: konstante Lichtverhältnisse, in der Regel weniger Einfahrten, Störungen und trotzdem durch Tunnelview langweilig und monoton. Insbesondere der Wechsel der Lichtverhältnisse an Einfahrt, Ausfahrt als oft grösstes Problem kann automatisiert werden!
- 13. Ich sehe keine Vorteile im Vergleich zu anderen Standorten (z.B. Autobahnen und andere richtungsgetrennte Strassen) und sehe eher gewisse Einschränkungen. (M.E.)
-

Frage 2:



Frage 3: «Andere» aus Frage 2, Erklärungen

- 1. Weitere Verkehrsbeziehungen durch andere Verkehrsmittel (z. B. Tram), Zu- und Abfahren, also Verflechtungsbereiche. Dazu auch Sonnenstände (Ein-/Ausfahrtportal).
- 2. Längere Tunnels sind vermutlich unproblematischer, wobei der kritische Portalbereich bei kurzen und langen gleich ist.
- 3. Verschmutzungsgrad
- 4. Keine der genannten Eigenschaften sollten die Sicherheit von automatisiertem Fahren gefährden. Gefährlich erscheinen nur aussergewöhnliche Zustände: illegale Überholmanöver, abgestellte Fahrzeuge, etc.
- 5. Unterbrechung der Back-End-Datenverbindung der Fahrzeuge. V2V- und V2X-Kommunikation wird eingeschränkt. Geopositionierung wird ungenau, Wahl der Fahrlinie ungenau. Kollisionsvermeidung verschlechtert sich. - Räumliche Enge und Einhausung durch Stahlkonstruktion kann Fahrzeugsensorik negativ beeinflussen. Radar-Signale können sich überschlagen und ein Rauschen verursachen. Dies führt u.U. zu Fehlinterpretationen durch die Bord-Algorithmen. - Fehlende Haltespuren sind bei L4-Fahrzeugen sehr risikobelastet. Wo soll das Fahrzeug für den risikominimalen Zustand halten, ohne Auffahrunfälle zu provozieren? - Post-Crash: Unfallfolgen und Rettung ist erschwert.
- 6. Alle Argumente beeinträchtigen die Sicherheit. Die grössten Herausforderungen sind der Gegenverkehr und langsamere Fz (z.B Schwerverkehr). Der Rest sollte durch das automatisierte Fahren einfach abzudecken sein!
- 7. Kommunikations-/Signalausfall (z. B. GPS)

Frage 4:



Frage 5: Begründung zu Frage 4

- 1. GPS ist aus meiner Sicht nicht sicherheitsrelevant. Die weiteren Sensoren (Kameras, Radare) wenig beeinflusst vom Tunnel

- 2. Die gegebene Antwort setzt selbstverständlich voraus, dass die autonom fahrenden Fahrzeuge durch Laser- und/oder Radartechnik keinerlei Technik bzw. Sensorik im Tunnel beeinflussen. Entsprechendes würde aber auch ausserhalb des Tunnels gelten.
- 3. Diese Frage ist unklar: Handelt es sich um die Sensoren der Fahrzeuge oder um zusätzliche Sensoren, die im Tunnel installiert sind? Français (France)
- 4. Kein GPS.
- 5. Lidar und Kameras können durch Reflexionen gestört werden
- 6. Dies ist insbesondere bei videobasierten Systemen wahrscheinlich stark abhängig von der Qualität der Beleuchtung und der Fähigkeit der Systeme, mit dem Übergang bei Tunnelein- und -ausfahrt umzugehen.
- 7. Im Moment kein GPS-Empfang in den Tunnels. Es könnte möglich sein, dass ein Auswerte-Algorithmus Probleme mit dem Ausfall des GPS hat.
- 8. Kondensation an Sensoren durch starke Temperaturschwankungen, Früherkennung einer wetterbedingten Erreichung der ODD (Operational Design Domain) nur eingeschränkt möglich, unklare Radar-Reflexionen
- 9. Es sind keine Eigenschaften von Tunneln zu erkennen, bezüglich derer sie schwieriger sensorisch zu erfassen wären als offene Strecken. Offene Strecken sind in allen Belangen komplexer.
- 10. siehe oben
- 11. Einbussen sind nicht tunnelabhängig
- 12. Die Leistung bestimmter Kameras kann bei starken Lichtveränderungen leiden. GPS-Sensoren können **in langen Tunneln das Signal verlieren**.

Frage 6:

6. Bitte schätzen Sie die Leistungseinbusse des LIDAR (Light Imaging Detection and Ranging) im Tunnel ab.

[Weitere Details](#)

[Einblicke](#)

- keine Leistungseinbusse 5
- minimale nicht sicherheitsrele... 3
- sicherheitsrelevante Einbussen 5
- Totalausfall 0
- kann ich nicht sagen 0



Frage7:

7. Bitte schätzen Sie die Leistungseinbusse des Radars im Tunnel ab.

[Weitere Details](#)

[Einblicke](#)

- keine Leistungseinbusse 4
- minimale nicht sicherheitsrele... 4
- sicherheitsrelevante Einbussen 4
- Totalausfall 0
- kann ich nicht sagen 1



Frage 8:

8. Bitte schätzen Sie die Leistungseinbusse von Videokameras im Tunnel ab.

[Weitere Details](#)

● keine Leistungseinbusse	3
● minimale nicht sicherheitsreleva...	5
● sicherheitsrelevante Einbusse	5
● Totalausfall	0



Frage 9:

9. Bitte schätzen sie die Leistungseinbusse der Thermal Infrared Camera im Tunnel ab.

[Weitere Details](#)

● keine Leistungseinbusse	5
● minimale nicht sicherheitsreleva...	5
● sicherheitsrelevante Einbusse	3
● Totalausfall	0



Frage 10: Falls Sie in den Fragen 6-9 Leistungseinbusse angegeben haben, beschreiben Sie bitte die spezifischen Probleme.

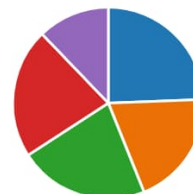
- 1. Aus meiner laienhaften Sicht werden, wenn dann nur gewöhnliche Videokameras ggf. Probleme mit den wechselnden Licht- und Verkehrsverhältnissen (GV) haben. Ähnlich wie bei der Videodetektion. Hier werden die Systeme sicher "lernen" müssen, um vollkommen sicher zu funktionieren. Ggf. müssen Kameras mit bestimmter Optik und automatischer Blendenverstellung eingesetzt werden.
- 2. Müssen nicht alle Sensoren funktionieren, um einen zuverlässigen autonomen Betrieb des Fahrzeugs zu gewährleisten? Es ist denkbar, dass die Kameras im Tunnel verloren gehen, weil die Beleuchtung ausfallen könnte. Français (France)
- 3. Radar: unregelmässige Reflexionen im Tunnel Video: funktioniert als Ereignisdetektion schon bei fest installierten Kameras ungenügend Thermal Infrared: Funktioniert nur auf direkte Sicht. Wenn das übernächste Auto brennt, wird das nicht erfasst.
- 4. Reflexionen (Kamera und Lidar) Materialienmix der Tunnelausrüstung (Radar)
- 5. Kondensation an Sensoren durch starke Temperaturschwankungen, unklare Radar-Reflexionen
- 6. Siehe Antwort auf Frage 5

Frage 11:

11. Minimales Set an Sensoren: Welche Fahrzeugsensoren müssen zwingend funktionieren, um im Tunnel automatisiert zu fahren?

[Weitere Details](#)

● Fahrspurassistent (Lane Departu...	10
● Videokamera	8
● Radar	9
● LIDAR Abstandhaltung (adapti...	9
● andere, bitte in der nächsten Fra...	5

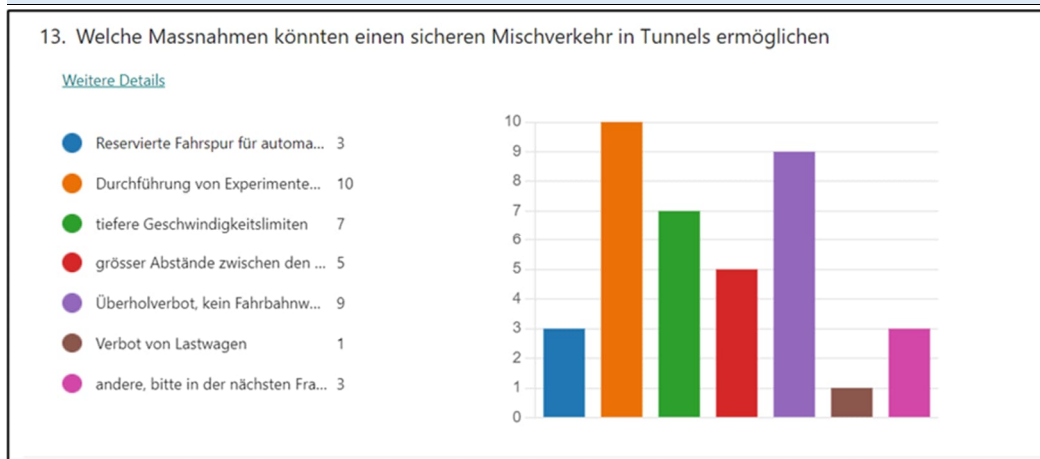


Frage 12: Falls unter 11. andere angekreuzt wurden, was meinen Sie?

- 1. Lichtabblendautomatik, was jedoch heute schon gegeben ist.
- 2. Ultraschallsensoren wegen Erhöhungen der seitlichen Fussgängerwege

- 3. Der Fahrspurassistent ist kein Sensor, sondern eine Funktion. Welche Sensoren eingesetzt werden, kann dem Anbieter überlassen werden. Es müssen die funktionellen Anforderungen definiert werden.
- 4. LDW ist m.E. kein Sensor, sondern greift auf diesen zurück.
- 5. Radar oder Lidar sind bezüglich Funktionalität in Tunnels austauschbar. Es muss schlicht ein System existieren, mit dem Abstände gemessen werden können.
- 6. Die Frage ist unglücklich formuliert. Dies weil a) sich der Fahrspurassistent m.W. auch auf die nachfolgend genannten Sensoren stützt (Video, Radar), also selbst keine Sensorik ist, sondern die Sensorik nutzt. Und b) ... und das ist wichtiger: Ein Automatisierungssystem muss in allen Bereichen, in denen es eingesetzt werden darf gleich gut und zuverlässig funktionieren. Es darf bei einer Befahrung eines Tunnels nicht zu einer Einschränkung der Funktionalität, der Redundanz des Systems oder eines erhöhten Risikos kommen. Somit ist die logische Antwort auf die Frage: alle müssen zwingend funktionieren, damit Tunnels als erweiterte ODD zugelassen werden können.
- 7. Sensor zur Ereignisdetektion, bei Hindernissen auf der Strasse
- 8. Das kann man nicht pauschal beantworten. Es hängt von der Funktionalität/Genauigkeit der einzelnen Sensoren ab, wie diese kombiniert werden, von den Anforderungen des jeweiligen Motion Planners...

Frage 13:



Frage 14: Falls Sie in 13 «andere» angekreuzt haben, was meinen Sie damit?

- 1. Die Punkte 3 - 6 wären sicher hilfreich. Es ist aber nicht anzunehmen, dass für die Einführung des automatisierten Fahrens solch "gravierende" Einschränkungen umsetzbar sind.
- 2 Einschränkungen erhöhen immer die Sicherheit. Das Ziel des automatisierten Fahrens sollte aber sein, keine zusätzlichen Einschränkungen auferlegen. Durch die strikte Einhaltung der Regeln (Abstand, Geschwindigkeit) wird bei automatisierten Fahrzeugen die Sicherheit erhöht.
- 3. Auch diese Frage erschliesst sich mir nicht ganz: Die Durchführung von Experimenten, um die Leistung von Sensoren zu beurteilen ist zwingend, bevor Tunnels als ODD für Fahrzeuge mit Automatisierungsfunktion zugelassen werden! Selbst die Fahrzeughersteller machen dies im Moment nicht (Mercedes S-Klasse L2 aus 2022). Bei der Durchführung dieser Versuche, sollten auch Szenarien und verkehrsbetriebliche Massnahmen im Mischverkehr überprüft werden. Tiefere Geschwindigkeiten helfen immer - den menschlichen und maschinellen Verarbeitungsprozessen sowie in Bezug auf Unfallfolgen. Eine Trennung mittels reservierter Fahrspur könnte auch helfen, die Komplexität im Verkehr zu verringern, hat aber wohl kaum Realisierungschancen.
- 4. Fz-Spuren pro Fz-Kategorie Schnell-, Langsamverkehr

Frage 15:

15. Welches der unten aufgeführten Systeme kann am besten die Fahrleistungen und Sicherheit von automatisierten Fahrzeugen in Tunnels verbessern?

[Weitere Details](#)

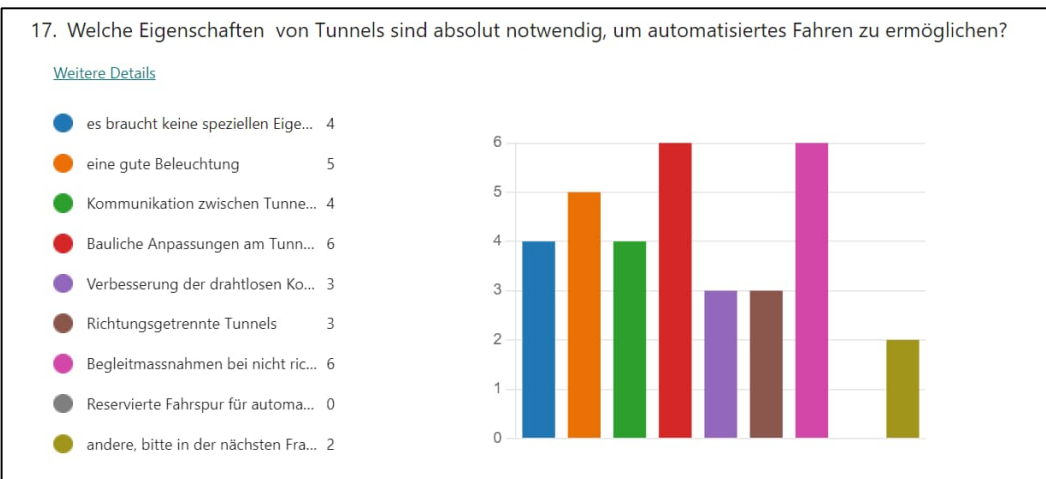
- Benutzung von Sensoren, welch... 12
- Einführung von Regeln für siche... 2
- Installation von neuen Kommuni... 5
- Verbesserung der Fahrzeug zu F... 5
- Kommunikation der ganzen Fah... 2



Frage 16: Bitte erklären Sie, basierend auf ihrer Auswahl von Frage 15, welche Sensoren müssten es sein? Wie könnten die einzuführenden Regeln aussehen? Welche Kommunikationsinfrastruktur wäre notwendig? Welche Art der Fahrzeug zu Fahrzeug Kommunikation bräuchte es? Was (welche Daten zu was) müsste kommuniziert werden?

- 1. Kombination der Sensoren der Frage 11.
- 2. Die Antworten sind rein logisch bzw. intuitiv getroffen und können von mir wegen fehlender Fachlichkeit nicht weiter beantwortet werden.
- 3. So viel wie möglich Français (France)
- 4. Sensoren und Kommunikation müssten ermöglichen, dass jedes (!) Fahrzeug ein genaues Lagebild des Tunnels erhält (Tunnelgeometrie, Markierung, Signalisation, Position aller Fahrzeuge, Geschwindigkeiten und Abstände, ...)
- 5. Position und Geschwindigkeitsänderungen sowie Geschwindigkeit müssten übermittelt werden. Hindernisse und Haftwertänderungen sollten kommuniziert werden. Deutsch
- 6. Zusätzliche Infrastruktur zur genauen Lokalisierung könnte helfen, das fehlende GPS-Signal zu kompensieren.
- 7. Automatisierte Fahrzeuge müssen auch bei passiver Infrastruktur den Weg finden. Die Kommunikation zur Infrastruktur dient nur die Bewältigung der Abweichung vom Normalbetrieb.
- 8. siehe Frage 11
- 9. Die Fahrzeuge müssen in Tunnels genauso gut funktionieren, wie ausserhalb. Wenn dafür bessere Sensoren und zusätzliche Installationen im Tunnel notwendig sind, dann müssen diese zwingend vorgeschrieben werden, um Tunnels als ODDs für AVs freizugeben.
- 10. Spurassistent, Distanzkontrolle

Frage 17:



Frage 18: Bitte beschreiben Sie die ausgewählten notwendigen Eigenschaften aus Frage 17.

- 1. Andere: Eindeutige Markierung am Boden. Kommunikation zwischen Tunnelinfrastruktur und Fahrzeug: Siehe Fragen 26 und 27.
- 2. Beleuchtung = Einflussfaktor für Kamerasysteme Kommunikation = Abgleich von Fahrzeugdaten untereinander (Standorte, Geschwindigkeit, Bremsverhalten), ggf. könne auch Fahrzeugprobleme (drohender Liegenbleiber, Rauchentwicklung) direkt an die Tunneltechnik übergeben werden, damit der Tunnel frühzeitig reagieren kann Begleitmassnahmen = Überholverbot, reduzierte Geschwindigkeit
- 3. Sehr gute Bodenmarkierungen und abgeschirmte Tunnelinfrastruktur würden den AV-Systemen helfen.
- 4. Automatisierte Fahrzeuge müssen in allen Tunnels, die nach heutigen Standards ausgerüstet sind, korrekt fahren. Die Kommunikation zur Infrastruktur dient nur die Bewältigung der Abweichung vom Normalbetrieb.
- 5. gute, automatisch lesbare Signalisierung, inklusive Spur-, Leit- und Sicherheitslinien.
- 6. "Absolut" notwendig ist keine, aber einige davon würden es einfacher/sicherer machen.

Frage 19:

19. Denken Sie, dass sich unter den heutigen Tunnels einige bereits ohne weitere Massnahmen als sichere Teststrecken für automatisiertes Fahren eignen könnten?

[Weitere Details](#)

● ja	9
● nein	4



Frage 20: Tunnels als sichere Teststrecken? Falls Sie Frage 19 mit ja beantwortet haben: Beschreiben Sie in kurzen Worten, weshalb sich einige Tunnels für automatisiertes Fahren speziell eignen, respektive genügend sicher sein sollen. Falls möglich nennen sie geeignete Tunnels.

- 1. Moderne Tunnels mit korrekten Markierungen.
- 2. Tunnels mit gerader Linienführung, Richtungsverkehr und einer Länge von max. 1000m.
- 3. Wenn diese genügend Querschnitt und eine Standspur haben (Westring um Zürich)
- 4. Die äusseren Einflüsse sind viel geringer als auf Strassen z.B. mit Mischverkehr.
- 5. speziell richtungstrennte Tunnels oder Tunnel mit Überholverbot sollten gut geeignet sein
- 6. Richtungstrennt, einspurig, wenig Witterungseinflüsse
- 7. in der Regel alle Autobahntunnels, da richtungstrennt, gut beleuchtet, gut signalisiert...
- 8. Solange die Fahrzeuge in der Lage sind, mit den zusätzlichen Herausforderungen der Tunnelumgebung umzugehen, kann jeder Tunnel ohne weitere Massnahmen für das autonome Fahren geeignet sein.

Frage 21: Falls Sie Frage 19 mit nein beantwortet haben: Beschreiben sie in kurzen Worten weshalb die heutigen Tunnels nicht sicher genug sein sollen, um automatisiertes Fahren zu ermöglichen

- 1 Jeder Tunnel muss individuell angeschaut und bewertet werden, ob die erforderliche Infrastruktur die Anforderungen an das autonome Fahren erfüllt und ob diese mit dem autonom fahrenden Fahrzeug kompatibel ist. Dazu müssen für die Fahrzeuge und die Tunnel Standards (Pflichtenheft) definiert und validiert werden, die beide Seiten erfüllen müssen.
- 2 Die Folgen einer Fehlfunktion sind zu gross, als dass es sich um eine Teststrecke handeln könnte. Français (France)
- 3 Es ist nicht so, dass sich die Tunnels nicht eignen, sondern ich gehe davon aus, dass die Fahrzeuge sich noch nicht für die Tunnelbefahrung eignen. Aber auch sonst fehlt meines. Erachtens. allen Tunnels die Möglichkeit, die Back-End-Verbindung der Fahrzeuge während der Durchfahrt aufrecht zu halten

Frage 22: Welche Eigenschaften sollten Tunnel unbedingt haben, um als Teststrecken für automatisiertes Fahren in Frage zu kommen?

- 1. Tunnels mit korrekten Markierungen.
- 2. Keine engen Radien, gute Beleuchtung, Fluchtwegkennzeichnung, gute Fahrbahnmarkierung, ausgewogen heller Asphalt, guter Kontrast von Fahrbahn und Wand (Betonfahrbahnen ggf. schwierig bzw. nicht so gut geeignet).
- 3. Einwandfreie bestehende Ausrüstung und Markierung sowie erfolgte Tunnelreinigung. Gilt aber nur für Teststrecke. Später dann müssen die Fahrzeuge mit allem zurechtkommen.
- 4. Umkehrung der Antworten in 23
- 5. Siehe Antwort 17
- 6. Für den Test braucht es keine Ausrüstungen, aber für das Monitoring sind Aufzeichnungssysteme notwendig.
- 7. Richtungstrennung
- 8. Einspurig, richtungstrennt
- 9. siehe oben
- 10. richtungstrennt, gut beleuchtet, gut signalisiert...
- 11. keine

Frage 23: Welche Eigenschaften dürfen Tunnels bei automatisiertem Fahren auf keinen Fall aufweisen? «No Go» Eigenschaften

- 1. Fehlende oder teilweise fehlende oder falsch interpretierbaren Markierungen.
- 2. Schlechte Beleuchtung, kurvenreich, keine dunkle Fahrbahn.
- 3. Ausnahmen von den Sicherheitsanforderungen Français (France)
- 4. Zu grosse Verschmutzung, zu schmale Spuren schlechtes Licht.

- 5.Keine
- 6.keine - muss selbstverständlich gehen
- 7.Abzweigungen und Einfahrten
- 8.siehe oben
- 9.keine Spurensignalisierung, schlechte Lichtverhältnisse
- 10.keine

Frage 24: Welche besonders sicherheitsrelevanten Schwierigkeiten erwarten Sie bei automatisiertem Fahren im Tunnel ?

- 1.Mischverkehr.
- 2.Erkennen GV-Verkehr, Spurhaltung, Standortbestimmung im Tunnel.
- 3.Reaktionen auf ungewöhnliche Situationen (Unfälle, Einsturz von Gewölben, Überschwemmungen usw.).
- 4.Vollbremsungen der Testfahrzeuge bei Sensor-"Störung" (Falscherkennung) Verhalten der übrigen Fahrzeuge (zu kleine Abstände, überhöhte Geschwindigkeit, ...)
- 5. Reflexionen, Stausituationen nach Unfällen oder Verkehrsüberlastung.
- 6. Störung der Sensoren durch Effekte der Tunnelwände und -decken - Stark wechselnde Lichtverhältnisse - Schwierige Lokalisation
- 7.Keine
- 8.Keine
- 9.Keine
- 10.Sicherheit
- 11.keine. Die Gesamtstrecke von Tunnels ist so gering, dass deren Integration in die ODDs der AVs keinen gesamtwirtschaftlichen Vorteil bringt. In Bezug auf die Sicherheit überwiegen aktuell noch die Risiken. Auch sonst ereignen sich in Tunnels nur wenige Unfälle, das Potenzial ist also eher gering. In Bezug auf die Kapazität ist über Jahrzehnte mit noch keinen positiven Effekten zu rechnen, solange ausgeprägten Formen des Mischverkehrs bestehen.
- 12.Kapazitätserhöhung durch optimale Fahrzeug Abstände, Geschwindigkeiten. Erhöhung der Sicherheit durch Wegbleiben von Auffahrunfällen, Überholmanöver
- 13.Wie auch bei anderen Strassen als Tunneln: Langfristig kann das automatisierte Fahren zu mehr Sicherheit und Kapazität führen.

Frage 25: Welche positiven Einflüsse (Kapazität, Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, etc.) erwarten Sie von automatisiertem Fahren im Strassentunnel?

- 1. Keine Angabe.
- 2. Wenn alle Systeme technisch aufeinander abgestimmt sind, die Fahrzeugte mit dem Tunnel und untereinander kommunizieren können, kann aus meiner Sicht von einer spürbaren Harmonisierung des Verkehrs ausgegangen werden. Der Verkehrsfluss sollte flüssiger und weniger stockend oder stauend sein. Der Verkehr kann ggf. sogar besser gelenkt und an das individuelle Ziel der Insassen geleitet werden (Ausweichrouten, die automatisch gewählt werden.
- 3. Verbesserung der Fluidität und Sicherheit in gewöhnlichen Situationen Français (France)
- 4. Alle erwähnten Punkte werden verbessert, sobald alle(!) Fz autonom unterwegs sind.
- 5. Mit Kommunikation Car2X kann mehr Durchsatz erreicht werden.
- 6. - Reduktion von schweren Unfällen
- 7. Die Kapazität wird sinken, weil alle Verkehrsregeln (Abstand, Geschwindigkeit) eingehalten werden. Unfälle wie Auffahrunfälle, Entgegenkommendes Fahrzeug werden verhindert.
- 8. Sicherheit, Kapazität, damit Wirtschaftlichkeit
- 9. - Kapazitätserhöhung durch Verstetigung des Verkehrsflusses - erhöhte Sicherheit (keine Ermüdung durch Monotonie, Wärme, Lichter, Stroboskop-Effekt, ...)
- 10. Sicherheit
- 11. keine. Die Gesamtstrecke von Tunnels ist so gering, dass deren Integration in die ODDs der AVs keinen gesamtwirtschaftlichen Vorteil bringt. In Bezug auf die Sicherheit überwiegen aktuell noch die Risiken. Auch sonst ereignen sich in Tunnels nur wenige Unfälle, das Potenzial ist also eher gering. In Bezug auf die Kapazität ist über Jahrzehnte mit noch keinen positiven Effekten zu rechnen, solange ausgeprägten Formen des Mischverkehrs bestehen.
- 12. Kapazitätserhöhung durch optimale Fahrzeugabstände, Geschwindigkeiten. Erhöhung der Sicherheit durch Wegbleiben von Auffahrunfällen, Überholmanöver
- 13. Wie auch bei anderen Strassen als Tunneln: Langfristig kann das automatisierte Fahren zu mehr Sicherheit und Kapazität führen.

Frage 26: : Bei Automatisiertem Fahren: Welche Eigenschaften bei der Tunneleinfahrt gilt es zu beachten?

- 1. Kamera: Schnelle Adaptation beim Wechsel der Lichtbedingungen. Radar: Berücksichtigung des "engen" Tunnelraums (Info aus Infrastruktur bei der Tunneleinfahrt)
- 2. Wie auch beim Menschen, muss die Adaptation stimmen, damit sich das Fahrzeug sofort neu orientieren kann. Ggf. können bestimmte (schon vorhandene) Schilder dem Fahrzeug über die Kamerasysteme einen Hinweis geben, dass nun ein Tunnel befahren wird. Dies wäre sicher auch in Kombination mit den GPS-Daten sinnvoll bzw. möglich.
- 3. Automatisches Fahren in der Einfahrtszone kann nur dann zuverlässig sein, wenn es bereits auf offenen Strecken und in Tunneln als zuverlässig gilt. Die Übergänge des Fahrbahnzustands (Schnee, nass, trocken) müssen verwaltet werden. Taupunkt kann die Funktion einiger Sensoren beeinträchtigen. Français (France)
- 4. Lichtverhältnisse, Kurve nach Einfahrt z.B. als Wand erkannt
- 5. Langsamer Lichtübergang, wenig Geschwindigkeitsvariation
- 6. Abrupter Wechsel der Licht- und Witterungs- und Umgebungsverhältnisse
- 7. Einschalten des Modus Level 5. Information des Fahrers.
- 8. Keine Speziellen: Tunneleinfahrten sind sehr gut erkennbar, signalisiert und beleuchtet.
- 9. Keine
- 10. Verstehe ich nicht tut mir leid
- 11. Keine
- 12. schnelle Änderungen der Beleuchtung, Ausfall von Signalen, unerwartetes Verhalten anderer Fahrer.

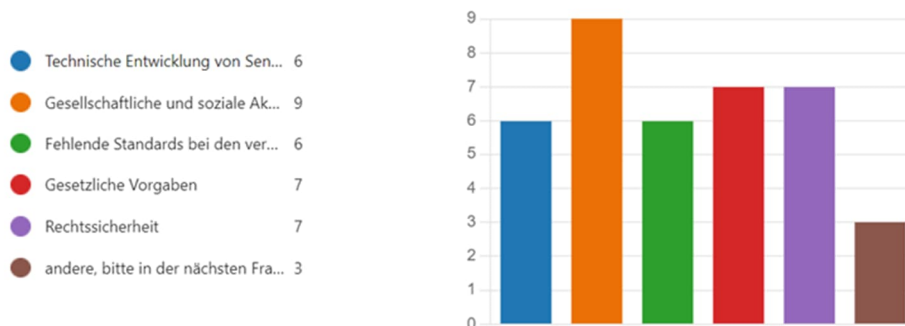
Frage 27: Bei Automatisiertem Fahren: Welche Eigenschaften bei der Tunnelausfahrt gilt es zu beachten?

- 1. Kamera: Schnelle Adaptation beim Wechsel der Lichtbedingungen. Radar: Berücksichtigung des "breiten" Raums auf offene Strecke (Info aus Infrastruktur bei der Tunnelausfahrt)
- 2. Blendeffekte, "plötzlich" veränderte Orientierungsmöglichkeiten (im Gegensatz zum Tunnel mitunter diffuser Verkehrsraum) für das Fahrzeug.
- 3. Die gleiche ausser Taupunkt. Français (France)
- 4. Witterungsverhältnisse
- 5. Blendung durch Sonne, Regen/Schnee
- 6. - Abrupter Wechsel der Licht- und Witterungs- und Umgebungsverhältnisse Deutsch
- 7. Ausschalten des Modus Level 5. Information des Fahrers.
- 8. Keine
- 9. Keine
- 10. Verstehe ich nicht tut mir leid
- 11. Keine
- 12. Schnelle Änderungen der Beleuchtung, unerwartetes Verhalten anderer Fahrer.

Frage 28:

28. Welches sind die grössten Herausforderungen beim Einführen des automatisierten Fahrens?

[Weitere Details](#)



Frage 29: Falls Sie bei Frage 28 "andere" ausgewählt haben, welche Herausforderungen meinen Sie?

- 1. Situationserkennung ("Verstehen" der Signale der Sensoren)
- 2. Diese Frage richtet den Fokus nun plötzlich weg von den Tunnels hin zum automatisierten Fahren allgemein. Das ist überraschend. Neben den genannten Herausforderungen gibt es noch sehr viel mehr.

Zudem ist zwischen Herausforderungen für die Verkehrssicherheit, aber auch für den Verkehrsfluss und das Verkehrsmanagement zu unterscheiden. So kann ich die Frage leider nicht beantworten.

- 3. Integration im Mischverkehr, Sicherheitsprüfungen

Frage 30: Die Vorstellung im Tunnel automatisiert zu fahren löst bei mir folgende Gefühle, Erwartungen oder Gedanken aus:

- 1. Begeisterung und Sicherheit - Schon heute fühle ich mich, dank dem Geschwindigkeitsregler mit Abstandsanpassung im stockenden Verkehr viel mehr entspannt und sicher. Deutsch
- 2. So wie ich mich auf den immer weiter hochentwickelten technischen Standard bei Flugzeugen verlasse, müssen autonome Fahrzeuge dies in Punkto Sicherheit auch in gleichwertiger Weise sein. Wenn dies nachweislich sichergestellt ist, würde ich mich in einem solchen Fahrzeug auch sicher fühlen. Für den Fall, dass es doch zu einem Ereignis kommt, muss das Fahrzeug ausreichende Sicherheitssysteme besitzen und die Selbstrettung der Insassen bestmöglich sicherstellen. Dies insbesondere auch in Bezug auf die E-Technologie.
- 3. Weniger Raser, mehr Sicherheit
- 4. Im Moment haben sicher alle Mühe, das Steuer aus der Hand zu geben und zu vertrauen. Das Ganze ist ein Prozess und wird sich entwickeln.
- 5. Wenn dies beherrscht wird, ist innerstädtische Fahren möglich
- 7. Solange nicht 100% der Fahrzeuge ausgerüstet sind, bleibt die Unsicherheit, dass der Fahrer jederzeit reagieren können muss.
- 8. keine
- 9. Vor allem bei langen Tunneln (Gotthard...): Komfort, sich von der langweiligen Aufgabe entbinden zu können
- 10. Wird in Zukunft normal sein
- 11. Mein subjektives Sicherheitsempfinden ist an dieser Stelle nicht hilfreich.
- 12. endlich!
- 13. keine

Frage 31: Mein beruflicher Hintergrund, meine Fachkenntnisse

- 1. Ingenieur
- 2. Seit 2000 Ingenieur im Bereich der Tunnelsicherheit, mit den Schwerpunkten (Planung und Dimensionierung von) Tunnellüftung (inkl. Steuerung und Regelung), Löschwasserversorgung, Abwasserpumpstationen, SÜLA (SISTO), sowie der allgemeinen Tunnelsicherheit und der Begutachtung von Tunneln (Tunnelinspektionen).
- 3. Ingenieur/in mit einigen Kenntnissen in Informatik und im Bereich der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung von Strassentunneln Français (France)
- 4. Fachspezialist Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen BSA im ASTRA
- 5. Automobilingenieur, Fz Sicherheit und Fz.Mechanik
- 6. Softwareentwicklung Flottensteuerung für automatisierte Fahrzeuge
- 7. Fachspezialist Betrieb- und Sicherheitsausrüstungen, Elektroingenieur mit Kenntnissen von Nachrichtentechnik und Informatik.
- 8. Experte Verkehrstelematik
- 9. Automobilingenieur, Fachkenntnisse im Bereich Fahrzeugaufbauten
- 10. Automobilingenieur, Fachkenntnisse im Bereich Fahrzeugaufbauten
- 11. Forschung, Schwerpunkt automatisiertes Fahren, HMI, Unfallprävention
- 12. Projektleiter Verkehrstechnik, Elektroingenieur ETH, >20 Jahre in der Branche Mobilität tätig
- 13. Wissenschaftler im Bereich Fahrzeugsysteme

Frage 32: Kontaktdaten für Nachfragen, freiwillig

II Gesamte TUSI-Liste / MUSS-Kriterien

Nr.	F	NS Nr.	Kanton	Objektname	MUSS					
					#Röhre(n) Stk.	Gegen-verkehr ja / nein	Länge >=1000m ja / nein	Länge [m]	Fussgänger ja / nein	Verflechtungen ja / nein
1	1	N16	BE	Aux Laives	1	j	n	225	n	#NV
2	1	N16	BE	Bévilard	2	n	n	200	n	#NV
3	1	N16	BE	Bözingen Nr. 1+2	2	n	n	445	n	#NV
4	1	N16	BE	Côte de Chaux	2	n	n	580	n	#NV
5	1	N16	BE	Court	1	j	n	650	n	#NV
6	1	N16	BE	Gorges	1	j	n	230	n	#NV
7	1	N16	BE	Graitery	1	j	j	2470	n	#NV
8	1	N16	BE	La Heutte	2	n	n	320	n	#NV
9	1	N16	BE	La Rochette	1	j	n	615	n	#NV
10	1	N05	BE	Ligerz	1	j	j	2505	n	#NV
11	1	N16	BE	Loveresse	1	j	n	400	n	#NV
12	1	N16	BE	Malleray	1	j	n	550	n	#NV
13	1	N16	BE	Métairie de Nidau	2	n	n	555	n	#NV
14	1	N16	BE	Moutier	2	n	j	1195	n	n
15	1	N16	BE	Pierre Pertuis	2	n	j	2110	n	n
16	1	N16	BE	Raimeux	1	j	j	3210	n	#NV
17	1	N16	BE	Sonceboz Nord	1	j	n	125	n	#NV
18	1	N16	BE	Sorvillier	2	n	n	235	n	#NV
19	1	N16	BE	Sous les Roches	2	n	n	200	n	#NV
20	1	N16	BE	Sous-le-Mont	1	j	j	1220	n	#NV
21	1	N16	BE	Taubenloch Nr. 3	1	j	n	190	n	#NV
22	1	N16	BE	Taubenloch Nr. 4	1	j	n	550	n	#NV
23	1	N16	BE	Taubenloch Nr. 5	1	j	n	125	n	#NV
24	1	N16	BE	Taubenloch Nr. 6	1	j	n	480	n	#NV
25	1	N16	BE	Taubenloch Nr. 7	1	j	n	115	n	#NV
26	1	N16	BE	Taubenloch Nr. 8	1	j	j	1030	n	#NV
27	1	N16	BE	Taubenloch Nr. 9	1	j	n	240	n	#NV
28	1	N16	BE/JU	Roche-St-Jean	1	j	n	211	n	#NV
29	1	N12	FR	Avry-devant-Pont	2	n	n	160	n	#NV
30	1	N01	FR	Bruyères-Châbles	2	n	j	1840	n	n
31	1	N01	FR	Chévrefu	2	n	n	105	n	#NV
32	1	N01	FR	Combette	2	n	j	1225	n	n
33	1	N01	FR	Frasses	2	n	n	465	n	#NV
34	1	N12	FR	Gumefens	2	n	n	340	n	#NV
35	1	N01	FR	Sévaz	2	n	n	530	n	#NV
36	1	N01	FR/BE	Vignes	2	n	j	2220	n	n
37	1	N01	GE	Arare (SN)	2	n	n	640	n	#NV
38	1	N01	GE	Bachet de Pesay (SN)	2	n	n	505	n	#NV
39	1	N01	GE	Chèvres	2	n	n	410	n	#NV
40	1	N01	GE	Confignon	2	n	j	1460	n	n
41	1	N01	GE	Halle 6-Palexpo	2	n	n	235	n	#NV
42	1	N01	GE	Palettes	2	n	n	565	n	#NV
43	1	N01	GE	Saconnex d'Arve (SN)	2	n	n	580	n	#NV
44	1	N01	GE	Vernier	2	n	j	1890	n	j
45	1	N16	JU	Balastière	1	j	n	60	n	#NV
46	1	N16	JU	Banné	2	n	j	1070	n	n
47	1	N16	JU	Beuchille	2	n	n	895	n	#NV

Nr.	F	NS Nr.	Kanton	Objektname	MUSS					
					#Röhre(n) Stk.	Gegen-verkehr ja / nein	Länge >=1000m ja / nein	Länge [m]	Fussgänger ja / nein	Verflechtungen ja / nein
48	1	N16	JU	Bois-de-Montaigre	2	n	n	940	n	#NV
49	1	N16	JU	Bure	1	j	j	3060	n	#NV
50	1	N16	JU	Choindez	1	j	j	3290	n	#NV
51	1	N16	JU	Develier	2	n	n	770	n	#NV
52	1	N16	JU	Grippons	1	j	n	160	n	#NV
53	1	N16	JU	Mont Terri	1	j	j	4060	n	#NV
54	1	N16	JU	Mont-Russelin	1	j	j	3575	n	#NV
55	1	N16	JU	Neu-Bois	2	n	n	940	n	#NV
56	1	N16	JU	Perche	2	n	j	1050	n	n
57	1	N05	NE	Areuse	2	n	n	480	n	#NV
58	1	N05	NE	Auvernier	2	n	n	180	n	#NV
59	1	N05	NE	Bevaix	1	j	j	1630	n	#NV
60	1	N05	NE	Champ-Coco	2	n	n	430	n	#NV
61	1	N05	NE	Champ-Coco, accès ville NE	1	j	n	80	n	#NV
62	1	N05	NE	Falaises	2	n	n	955	n	#NV
63	1	N05	NE	Gorgier	2	n	j	2955	n	j
64	1	N05	NE	Hauterive	2	n	n	610	n	#NV
65	1	N05	NE	Monruz	2	n	n	290	n	#NV
66	1	N20	NE	NEB-Boudevillier	1	j	n	550	n	#NV
67	1	N20	NE	NEB-Col-des-Roches	1	j	n	100	n	#NV
68	1	N20	NE	NEB-Gorges du Seyon	1	j	j	1950	n	#NV
69	1	N20	NE	NEB-Hauts-Geneveys	1	j	n	810	n	#NV
70	1	N20	NE	NEB-Malvillier	1	j	n	340	n	#NV
71	1	N20	NE	NEB-Mont-Sagne	1	j	j	1610	n	#NV
72	1	N20	NE	NEB-Vue-des-Alpes	1	j	j	3250	n	#NV
73	1	N05	NE	Neuchâtel Est	2	n	j	2740	n	j
74	1	N05	NE	Neuchâtel Ouest	2	n	j	1035	n	j
75	1	N05	NE	Nid-du-Crô, bretelle	1	j	n	120	n	#NV
76	1	N05	NE	Prébarreau	1	j	n	125	n	#NV
77	1	N05	NE	Rouges-Terres	2	n	n	405	n	#NV
78	1	N05	NE	Rue des Tunnels	2	n	n	465	n	#NV
79	1	N05	NE	Sauges	2	n	j	2615	n	j
80	1	N05	NE	Serrières	1	j	j	1115	n	#NV
81	1	N05	NE	St-Aubin	1	j	n	175	n	#NV
82	1	N05	NE	St-Blaise	2	n	n	400	n	#NV
83	1	N05	NE	Treytel Ouest	1	j	j	1000	n	#NV
84	1	N05	NE	Vaumarcus	1	j	n	110	n	#NV
85	1	N05	NE	Vigner	2	n	n	355	n	#NV
86	1	N05	NE	Chanélaz	2	n	n	715	n	#NV
87	1	N01	VD	Arrioules	2	n	j	3020	n	n
88	1	N09	VD	Belmont	2	n	n	385	n	#NV
89	1	N01	VD	Champ Baly	2	n	n	220	n	#NV
90	1	N09	VD	Chauderon	2	n	n	195	n	#NV
91	1	N05	VD	Concise	2	n	j	1415	n	n
92	1	N09	VD	Criblette	2	n	n	280	n	#NV
93	1	N09	VD	Flonzaley	2	n	n	725	n	#NV
94	1	N09	VD	Glion	2	n	j	1345	n	n
95	1	N01	VD	Grand Bois	1	j	n	45	n	#NV
96	1	N05	VD	Lance	2	n	n	335	n	#NV
97	1	N05	VD	Onnens	2	n	n	620	n	#NV

Nr.	F	NS Nr.	Kanton	Objektname	MUSS					
					#Röhre(n) Stk.	Gegen-verkehr ja / nein	Länge >=1000m ja / nein	Länge [m]	Fussgänger ja / nein	Verflechtungen ja / nein
98	1	N01	VD	Pomy	2	n	j	2990	n	n
99	2	N06	BE	Allmend	2	n	n	960	n	#NV
100	2	N01	BE	Brünnen	2	n	j	1060	n	j
101	2	N05	BE	Büttenberg	2	n	j	1500	n	n
102	2	N08	BE	Chüebalm	1	j	j	1339	n	#NV
103	2	N08	BE	Giessbach	1	j	j	3340	n	#NV
104	2	N05	BE	Längholz	2	n	j	2500	n	j
105	2	N08	BE	Leimern	1	j	n	250	n	#NV
106	2	N08	BE	Leissigen	1	j	j	2200	n	#NV
107	2	N08	BE	Lütschine	1	j	n	545	n	#NV
108	2	N06	BE	NEB-Mitholz	1	j	n	653	n	#NV
109	2	N06	BE	NEB-Spiezwiler	1	j	n	483	n	#NV
110	2	N01	BE	Neufeld	1	j	n	575	n	#NV
111	2	N05	BE	Pieterlen	2	n	j	1470	n	n
112	2	N01	BE	Rüedtligen-Alchenflüh	2	n	n	290	n	#NV
113	2	N08	BE	Rugen	2	n	n	780	n	#NV
114	2	N08	BE	Sengg	1	j	n	823	n	#NV
115	2	N06	BE	Simmenfluh	1	j	n	700	n	#NV
116	2	N08	BE	Soliwald Brienzwiler	1	j	n	555	n	#NV
117	2	N06	BE	Sonnenhof	2	n	n	300	n	#NV
118	2	N12	BE	Thörishaus	2	n	n	110	n	#NV
119	2	N09	VD	Arzilier	2	n	n	420	n	#NV
120	2	N09	VS	Bächwald	1	j	n	120	n	#NV
121	2	N09	VS	Casermetta	1	j	n	304	n	#NV
122	2	N09	VS	Champsec Sion	2	n	n	710	n	#NV
123	2	N09	VS	Eyholz	2	n	j	4260	n	n
124	2	N09	VS	Gabi	1	j	n	69	n	#NV
125	2	N09	VS	Gamsen	2	n	j	1020	n	n
126	2	N09	VS	Gesterna	1	j	n	110	n	#NV
127	2	N09	VS	Gstipf	1	j	n	215	n	#NV
128	2	N09	VS	Kapf 1+2	1	j	n	160	n	#NV
129	2	N09	VS	Kulm mit Galerie	1	j	n	376	n	#NV
130	2	N09	VS	NEB-Mont Chemin	1	j	j	1843	n	#NV
131	2	N09	VS	NEB-Mittal	1	j	j	2531	n	#NV
132	2	N21	VS	NEB-Lavanchy	1	j	n	80	n	#NV
133	2	N21	VS	NEB-la Monnaie	1	j	n	90	n	#NV
134	2	N21	VS	NEB-Lavanchet	1	j	n	110	n	#NV
135	2	N21	VS	NEB-Sorevy	1	j	n	520	n	#NV
136	2	N21	VS	NEB-des Toules	1	j	n	220	n	#NV
137	2	N09	VS	Schallberg	1	j	n	465	n	#NV
138	2	N09	VS	Sierre	2	n	j	2450	n	n
139	2	N09	VS	St. Maurice	2	n	j	1225	n	n
140	2	N09	VS	Turtmann	2	n	j	1360	n	n
141	2	N09	VS	Wechselkehr	1	j	n	123	n	#NV
142	3	N01	AG	Baregg	3	n	j	1080	n	n
143	3	N03	AG	Bözberg	2	n	j	3700	n	n
144	3	N03	AG	Habsburg	2	n	j	1540	n	n
145	3	N01	AG	Neuenhof	2	n	n	370	n	#NV
146	3	N03	AG	Schinzacherfeld	2	n	n	450	n	#NV
147	3	N02	BL	Arisdorf	2	n	j	1360	n	n

Nr.	F	NS Nr.	Kanton	Objektname	MUSS					
					#Röhre(n) Stk.	Gegen-verkehr ja / nein	Länge >=1000m ja / nein	Länge [m]	Fussgänger ja / nein	Verflechtungen ja / nein
148	3	N02	BL	Ebenrain	2	n	n	390	n	#NV
149	3	N18	BL	NEB-Eggflue	1	j	j	2790	n	#NV
150	3	N18	BL	NEB-Reinach	2	n	n	600	n	#NV
151	3	N22	BL	NEB-Schönthal	2	n	j	2140	n	j
152	3	N02	BL	Oberburg	2	n	n	200	n	#NV
153	3	N02	BL	Schänzli (Zubr.)	2	n	n	620	n	#NV
154	3	N02	BL	Schweizerhalle	2	n	j	1030	n	j
155	3	N02	BL/SO	Belchen	2	n	j	3300	n	n
156	3	N02	BS	Breite RV	1	j	n	300	n	#NV
157	3	N02	BS	Horbürg	2	n	n	900	n	#NV
158	3	N02	BS	Oberer (SN) RV	1	j	n	150	n	#NV
159	3	N02	BS	Schwarzwald	2	n	n	600	n	#NV
160	3	N02	BS	Singer (SN) RV	1	j	n	310	n	#NV
161	3	N02	BS	St. Johann	2	n	j	1200	n	j
162	3	N02	BS	Pratteler RV	1	j	n	250	n	#NV
163	3	N02	LU	Eich	2	n	n	910	n	#NV
164	3	N02	LU	Mariazell	2	n	n	230	n	#NV
165	3	N14	LU	Rathausen	2	n	n	680	n	#NV
166	3	N02	LU	Reussport	2	n	n	600	n	#NV
167	3	N02	LU	Schlund	2	n	n	960	n	#NV
168	3	N02	LU	Sonnenberg	2	n	j	1600	n	n
169	3	N02	LU	Spier	2	n	j	1490	n	n
170	3	N02	NW	Acheregg	1	j	n	271	n	#NV
171	3	N02/ 08	NW	Kirchenwaldtunnel	2	n	j	1594	n	j
172	3	N02	NW	Stansstad	2	n	n	377	n	#NV
173	3	N08	NW/OW	Lungern	1	j	j	3570	n	#NV
174	3	N08	OW	Giswil	1	j	j	1630	n	#NV
175	3	N08	OW	Lopper	1	j	j	1562	n	#NV
176	3	N08	OW	Sachseln	1	j	j	5213	n	#NV
177	3	N08	OW	Zollhaus	1	j	n	417	n	#NV
178	3	N05	SO	Birchi	2	n	j	1430	n	n
179	3	N05	SO	Grenchner Witi	2	n	j	1760	n	n
180	3	N04	SO	Lackenhof	2	n	n	110	n	#NV
181	3	N05	SO	Lüsslingen	2	n	j	1230	n	n
182	3	N05	SO	Spitalhof	2	n	n	540	n	#NV
183	3	N04	SZ	Dorni	1	j	n	25	n	#NV
184	3	N04	SZ	Engiberg	2	n	n	263	n	#NV
185	3	N04	SZ	Franziskus Morschach	1	j	n	21	n	#NV
186	3	N04	SZ	Lau Morschach	1	j	n	55	n	#NV
187	3	N04	SZ	Mositunnel	1	j	j	1080	n	#NV
188	3	N04	SZ	Oelberg	1	j	n	350	n	#NV
189	3	N04	SZ	Schiferenegg	1	j	n	135	n	#NV
190	3	N04	SZ	Schöneegg	2	n	n	197	n	#NV
191	3	N02	TI	Banchi	1	j	n	70	n	#NV
192	3	N02	TI	Fiend	1	j	n	766	n	#NV
193	3	N04	UR	Axenfluh	1	j	n	390	n	#NV
194	3	N04	UR	Buggital	1	j	n	113	n	#NV
195	3	N04	UR	Chämleten	1	j	n	30	n	#NV
196	3	N04	UR	Fadegg	1	j	n	22	n	#NV
197	3	N02	UR	Fischlauri	2	n	n	105	n	#NV

Nr.	F	NS Nr.	Kanton	Objektname	MUSS					
					#Röhre(n) Stk.	Gegen-verkehr ja / nein	Länge >=1000m ja / nein	Länge [m]	Fussgänger ja / nein	Verflechtungen ja / nein
198	3	N04	UR	Flüelertunnel	1	j	j	2600	n	#NV
199	3	N04	UR	Gumpisch	1	j	n	100	n	#NV
200	3	N04	UR	Kleine Galerie	1	j	n	162	n	#NV
201	3	N04	UR	Stutzegg	1	j	n	320	n	#NV
202	3	N02	UR	Taubach	2	n	n	260	n	#NV
203	3	N04	UR	Tellsplatten	1	j	n	234	n	#NV
204	3	N02	UR	Uernerloch	1	j	n	72	n	#NV
205	3	N04	UR	Zarenkopf	1	j	n	65	n	#NV
206	3	N04	UR	Zingel	1	j	n	354	n	#NV
207	3	N02	UR	Intschi 1	2	n	n	130	n	#NV
208	3	N02	UR	Intschi 2	2	n	n	100	n	#NV
209	3	N02	UR	Langlauri	2	n	n	350	n	#NV
210	3	N02	UR	Naxberg	2	n	n	290	n	#NV
211	3	N02	UR	Platti	2	n	n	440	n	#NV
212	3	N02	UR	Ried	2	n	n	260	n	#NV
213	3	N02	UR	Steglauri m. Galerie	1	j	n	329	n	#NV
214	3	N02	UR	Teifital	2	n	n	520	n	#NV
215	3	N02	UR/NW	Seelisbergtunnel	2	n	j	9280	n	n
216	3	N02	UR/TI	Gotthard	1	j	j	####	n	#NV
217	4	N03	GL	Glattwand	1	j	n	100	n	#NV
218	4	N03	GL	Kerenzer	1	j	j	5760	n	#NV
219	4	N03	GL	Mühlehorn	1	j	n	260	n	#NV
220	4	N03	GL	Ofenegg	1	j	n	370	n	#NV
221	4	N03	GL	Standenhorn	1	j	n	230	n	#NV
222	4	N03	GL	Stutz	1	j	n	144	n	#NV
223	4	N03	GL	Weisswand	1	j	n	460	n	#NV
224	4	N03	SG	Fratten	2	n	n	320	n	#NV
225	4	N03	SG	Hof	2	n	n	560	n	#NV
226	4	N13	SG	Montlingen	2	n	n	300	n	#NV
227	4	N03	SG	Murgwald	2	n	j	1420	n	n
228	4	N03	SG	Quarten	2	n	j	1040	n	n
229	4	N03	SG	Raischibe	2	n	n	800	n	#NV
230	4	N01	SG	Rosenberg	2	n	j	1435	n	j
231	4	N01	SG	Schoren	2	n	j	1100	n	j
232	4	N01	SG	St. Fiden	1	j	n	320	n	#NV
233	4	N01	SG	Stephanshorn	2	n	n	570	n	#NV
234	4	N04	SH	Galgenbuck	1	j	j	1138	n	#NV
235	4	N04	SH	Fäsenstaub	1	j	j	1460	n	#NV
236	4	N04	SH	Schönenberg	1	j	n	420	n	#NV
237	4	N03	SZ	Altendorf	2	n	n	600	n	#NV
238	4	N03	SZ	Blatt	2	n	n	510	n	#NV
239	4	N03b	SZ	NEB-Buchberg	2	n	n	500	n	#NV
240	4	N07	TG	Aspizholz UEF	2	n	n	150	n	#NV
241	4	N07	TG	Fuchswies UEF	2	n	n	200	n	#NV
242	4	N07	TG	Girsberg	2	n	j	1800	n	n
243	4	N01	TG	NEB-Rinderweid	2	n	n	385	n	#NV
244	4	N03	ZH	Aescher	2	n	j	2160	n	j
245	4	N11	ZH	Bubenholz	2	n	n	600	n	#NV
246	4	N04	ZH	Cholfirst	1	j	j	1250	n	#NV
247	4	N03	ZH	Eggrain	2	n	n	435	n	#NV

Nr.	F	NS Nr.	Kanton	Objektname	MUSS					
					#Röhre(n) Stk.	Gegen-verkehr ja / nein	Länge >=1000m ja / nein	Länge [m]	Fussgänger ja / nein	Verflechtungen ja / nein
248	4	N04	ZH	Eigi UEF	2	n	n	120	n	#NV
249	4	N03	ZH	Entlisberg	2	n	n	550	n	#NV
250	4	N01	ZH	Gubrist	2	n	j	3230	n	n
251	4	N03	ZH	Hafnerberg	2	n	j	1275	n	j
252	4	N03	ZH	Honeret	2	n	n	450	n	#NV
253	4	N04	ZH	Isisberg	2	n	j	5000	n	n
254	4	N01	ZH	Milchbuck (SN)	1	j	j	1910	n	#NV
255	4	N04	ZH	Rüteli	2	n	n	500	n	#NV
256	4	N01	ZH	Schöneich (SN)	2	n	n	700	n	#NV
257	4	N01	ZH	Stelzen	2	n	n	375	n	#NV
258	4	N04	ZH	Uetliberg	2	n	j	4410	n	j
259	4	N15	SG	NEB-Aspwald	1	j	n	390	n	#NV
260	4	N15	SG	NEB-Uznaberg	2	n	n	930	n	#NV
261	4	N15	SG	NEB-Erlen	1	j	n	190	n	#NV
262	4	N15	SG	NEB-Jonerwald	1	j	n	400	n	#NV
263	4	N15	SG	NEB-Balmenrain	1	j	j	1310	n	#NV
264	4	N15	SG	NEB-Balmenrain	1	j	j	1310	n	#NV
265	5	N13	GR	Bärenburg	1	j	j	1028	n	#NV
266	5	N13	GR	Bargias	1	j	n	416	n	#NV
267	5	N13	GR	Benabbia Mesocco	1	j	n	181	n	#NV
268	5	N13	GR	Brusei	1	j	n	540	n	#NV
269	5	N28	GR	Büel	1	j	n	108	n	#NV
270	5	N13	GR	Cassanawald	1	j	n	870	n	#NV
271	5	N28	GR	Chlus	1	j	n	852	n	#NV
272	5	N13	GR	Crapteig	1	j	j	2171	n	#NV
273	5	N13	GR	Cresta	1	j	n	100	n	#NV
274	5	N13	GR	Gei	1	j	n	410	n	#NV
275	5	N13	GR	Gorda Mesocco	1	j	n	130	n	#NV
276	5	N28	GR	Gotschna	1	j	j	4207	n	#NV
277	5	N13	GR	Isla Bella	1	j	j	2449	n	#NV
278	5	N28	GR	Karlihof	1	j	n	220	n	#NV
279	5	N28	GR	Küblis	1	j	j	2255	n	#NV
280	5	N13	GR	Landrüfe	1	j	n	235	n	#NV
281	5	N29	GR	NEB-Alvaschein	1	j	n	957	n	#NV
282	5	N29	GR	NEB-Crap Sès	1	j	n	704	n	#NV
283	5	N29	GR	NEB-Passmal	1	j	n	503	n	#NV
284	5	N29	GR	NEB-Sils	1	j	j	1625	n	#NV
285	5	N29	GR	NEB-Silvaplana	1	j	n	749	n	#NV
286	5	N29	GR	NEB-Solis	1	j	j	1162	n	#NV
287	5	N13	GR	Plazzas	1	j	n	254	n	#NV
288	5	N13	GR	Rofla	1	j	j	1017	n	#NV
289	5	N13	GR	Rongellen III	1	j	n	132	n	#NV
290	5	N28	GR	Saas	1	j	j	2577	n	#NV
291	5	N13	GR	San Bernardino	1	j	j	6596	n	#NV
292	5	N13	GR	San Fedele	1	j	j	2381	n	#NV
293	5	N13	GR	Traversa	1	j	n	372	n	#NV
294	5	N13	GR	Viamala	1	j	n	761	n	#NV
295	5	N13	GR	Wegerhaus m. Gal.	1	j	n	177	n	#NV
296	5	N02	TI	Biaschina	2	n	n	515	n	#NV
297	5	N02	TI	Casletto	2	n	n	192	n	#NV

Nr.	F	NS Nr.	Kanton	Objektname	MUSS					
					#Röhre(n) Stk.	Gegen-verkehr ja / nein	Länge >=1000m ja / nein	Länge [m]	Fussgänger ja / nein	Verflechtungen ja / nein
298	5	N02	TI	Gentilino	2	n	n	632	n	#NV
299	5	N02	TI	Gribbiasca	2	n	n	160	n	#NV
300	5	N02	TI	Maroggia	2	n	n	590	n	#NV
301	5	N02	TI	Melide-Grancia	2	n	j	1730	n	j
302	5	N02	TI	Monte Ceneri	2	n	j	1425	n	n
303	5	N13	TI	NEB-Mappo-Moretina	1	j	j	5500	n	#NV
304	5	N02	TI	Pardorea	2	n	n	600	n	#NV
305	5	N02	TI	Piottino	2	n	n	842	n	#NV
306	5	N02	TI	Piumogna	2	n	j	1538	n	n
307	5	N02	TI	Quinto	2	n	n	293	n	#NV
308	5	N02	TI	Stalvedro	2	n	n	318	n	#NV
309	5	N02	TI	Taverne	2	n	n	320	n	#NV

III Indikatoren aus Risikokzept

In der Vorbereitungsphase wurde nach Informationen über Tunnelsicherheit gesucht. Die Publikation Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen [110] liefert Checklisten mit Kriterien, welche für eine Risikoanalyse herangezogen werden können. Die beiden Checklisten wurden zur Plausibilisierung der «**Muss**» und «**Kann**» Kriterien herangezogen.

Indikatoren	Verkehr	Fahrtrichtung
		Zeitvariationskurven
		Tageszeit
		Verkehrsmenge
		Anteil Schwerverkehr
		Stau
		Geschwindigkeit
		ADR Klasse
		Bauwerk
	Zonen	
	Einfahrt/Ausfahrt	
	Kurvenradius	
	Längsneigung	
	Fahrspurbreite	
	Anzahl Spuren	
	Verkehrsführung	
	Abstand Notausgänge	
	Querneigung	
	Entwässerungssysteme	
	Nebenanlagen	Abstand Einlaufschächte
		Grösse der Schlitzrinne
		Beleuchtung
		Lüftungssystem
		Notbeleuchtung
	Ereignisdetektion	

Abb. 10 Übersicht über die Indikatoren des Risikokzeptes für Tunnel

IV Checkliste zur Bestimmung einer besonderen Charakteristik

Gemäss der Publikation [110] liegt eine besondere Charakteristik vor, wenn eine oder mehr der folgenden Fragen mit Ja beantwortet werden kann:

Bauwerk	Ist die Tunnellänge > 5 km?	
	Wechselnde Umnutzung der Tunnelröhre, z.B. wechselnde Richtung bei Richtungsverkehr oder zeitweise Gegenverkehr?	
	Ein-/Ausfahrten im Tunnel?	
	Veränderung der Anzahl Fahrspuren in einer Tunnelröhre?	
	Gibt es 4 oder mehr Fahrspuren in einer Tunnelröhre?	
	Ist die Fahrspurbreite der rechten Spur < 3.50 m?	
	Ist die Querneigung > 5.0 % oder < 2.5 %?	
	Ist die Längsneigung an einer Stelle im Tunnel > 3 %?	
Verkehr	Ist beim Gegenverkehrstunnel die Verkehrsmenge > 13'300 Fzg./ (Fahrspur, 24 h)?	
	Ist beim Richtungsverkehrstunnel die Verkehrsmenge > 14'200 Fzg./ (Fahrspur, 24 h)?	
	Ist beim Gegenverkehrstunnel die Verkehrsmenge in der Spitzenstunde > 1'600 Fzg./ (Fahrspur, h)?	
	Ist beim Richtungsverkehrstunnel die Verkehrsmenge in der Spitzenstunde > 1'900 Fzg./ (Fahrspur, h)?	
	Mehr als 75 h Stau pro Jahr?	
	Ist der Anteil des Lkw -Verkehrs > 15 %?	
	Anteil der Anteil des Gefahrgutverkehrs > 6 % vom Lkw Anteil?	
	Ist beim Richtungsverkehrstunnel die signalisierte Geschwindigkeit > 100 km/h?	
	Ist beim Gegenverkehrstunnel die signalisierte Geschwindigkeit > 80 km/h?	
	Ist die signalisierte Geschwindigkeit bei einer Durchfahrt des Tunnels nicht konstant (Wechsel der Beschilderung)?	

Abb. 11 Checkliste zur Bestimmung einer besonderen Charakteristik

Auch diese Liste wurde zur Plausibilisierung der erstellten «Muss» und «Kann» Kriterien verwendet.

Gemäss Auskunft ASTRA gibt es zurzeit keine systematische Erfassung aller Tunnels mit den Listen aus Anhang 8.3 und 8.4.

V Fotos aus Videodatenbank

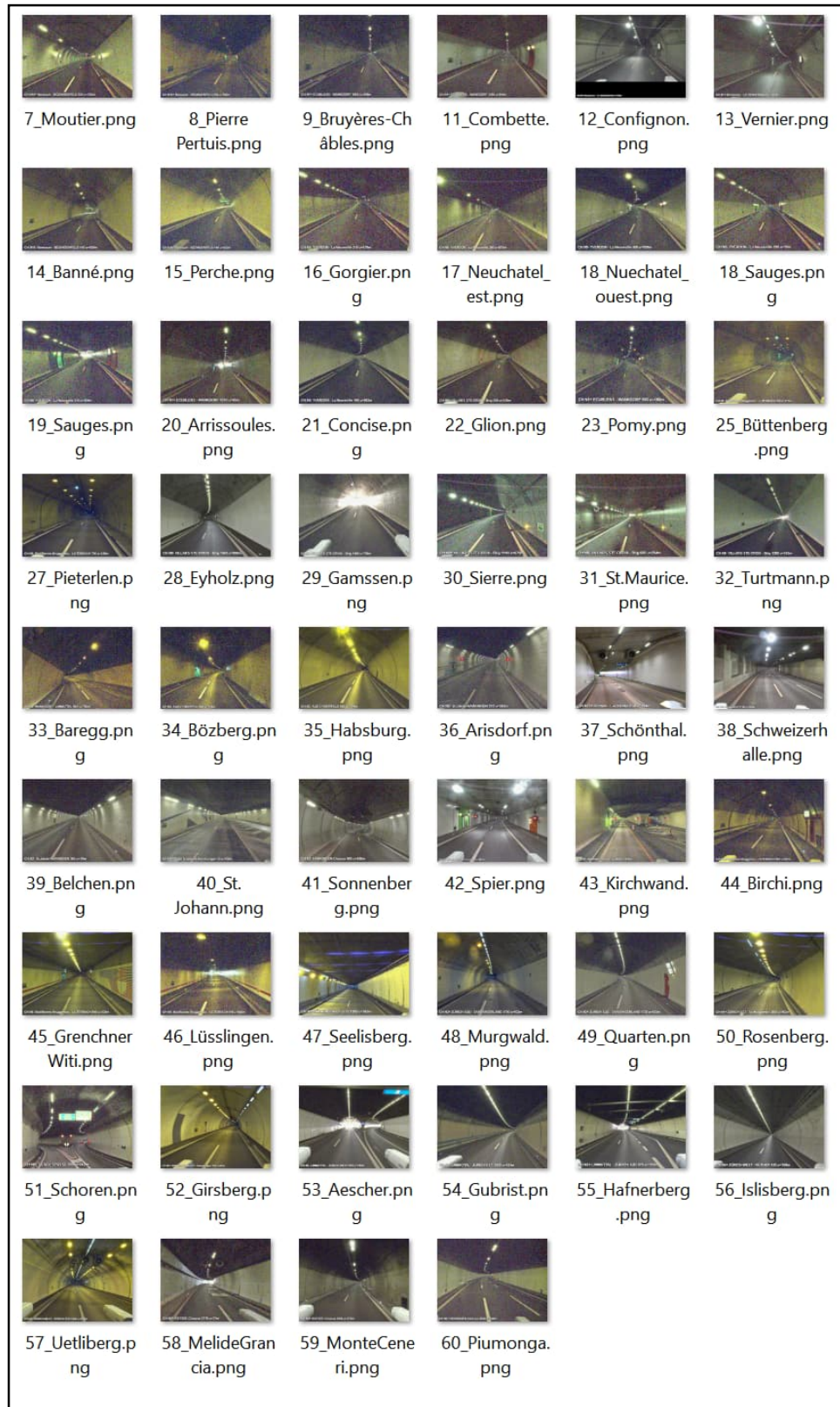


Abb. 12 Beispiel Foto aus Videodatenbank ASTRA

Die Beispielfotos illustrieren die Bildinformation, mit deren Hilfe die Tunnel hinsichtlich der vorgegebenen «**Muss**» und «**Kann**» Kriterien beurteilt wurden. Das Bildmaterial ist teilweise aus 2019 und einzelne Tunnel sind zwischenzeitlich saniert worden.

Glossar

Begriff	Bedeutung
AADT	Annual Average Daily Traffic
ACC	Adaptive Cruise Control
AEB	Automated Emergency Breaking
AV	Automated Vehicle
CART	Classification and Regression Tree
CAV	Connected Automated Vehicle
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
GES	General Estimates System
GNSS	Global Navigation Satellite System
HV	Heavy Vehicles, Schwere Fahrzeuge
IP	Intellectual Property
LDW	Lane Departure Warning
LiDAR	Light Imaging, detection and ranging
ODD	Operational Design Domain
SAE	Society of Automotive Engineers
STAMP	Systems- Theoretic Accident Modell and Processes
TUSI	Stand Tunnelsicherheit bezüglich Selbstrettung
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
VTI	The Swedish National Road and Transport Research Institute

Literaturverzeichnis

-
- [1] NZZ, „**Automatisiertes Fahren in der Schweiz: Das Steuer aus der Hand geben**“, Neue Zürcher Zeitung, 2020, Zugegriffen: 12. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nzz.ch/mobilitaet/automobil/automatisiertes-fahren-in-der-schweiz-das-steuer-aus-der-hand-geben-id.1542879>
-
- [2] „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr**.“, Bern, 2020.
-
- [3] M. Rasch, „**Die Zukunft muss warten-Etablierte Autokonzerne verlieren beim autonomen Fahren den Anschluss**.“, NZZ, Kommentar, Dez. 2020.
-
- [4] „**Path to a self driving future - Five transitions steps identified**.“, KIM, Netherlands Institute for Transport Policy Analysis, Ministry of infrastructure and the environment, Netherlands, Netherlands, 2017.
-
- [5] „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 4: Neue Angebotsformen**.“, Bern, 2020.
-
- [6] K. Kockelman u. a., „**An Assessment of autonomous vehicles: “Traffic impacts and infrastructure needs**.“, Center for Transportation Research, The university of Texas at Austin, USA, Austin, 2017.
-
- [7] S. Altenburg, H. P. Kienzler, und A. Auf der Maur, „**Einführung von Automatisierungsfunktionen in der PKW-Flotte. Auswirkungen auf Bestand und Sicherheit**.“ Studie im Auftrag ADAC, 2018.
-
- [8] S. Krause, N. Motamedidehkordi, S. Hoffmann, F. Busch, M. Hartmann, und P. Vortisch, „**Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstrasseninfrastruktur**.“, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2017.
-
- [9] „**Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag. Studie zu denkbaren Anwendungen und Effekten in der Schweiz**. Factsheet“. Schweizerischer Städteverband, 2017.
-
- [10] „**Automatisiertes Fahren. Merkblatt zur Durchführung von Pilotversuchen in der Schweiz**.“, ASTRA, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern, 2018.
-
- [11] C. Bertoldi, „**Die Zukunft liegt im Untergrund**“, S. 22–26, 2017.
-
- [12] W. Broere, „**Urban underground space: Solving the problems of today’s cities**“, S. 245–248, 2016.
-
- [13] „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens. Teilprojekt 2 Verkehrliche Auswirkungen und Infrastrukturbedarf**.“, Bern, 2020.
-
- [14] „**Der Gotthard-Strassentunnel -10 Jahre nach dem Brand**.“, Bundesamt für Strassen ASTRA, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern, 2011.
-
- [15] „**Netzzustandsbericht der Nationalstrassen Ausgabe 2019**“, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern, 2020.
-
- [16] „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 1: Nutzungsszenarien und Auswirkungen**.“, Bern, 2020.
-
- [17] „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 3; Umgang mit Daten**.“, Bern, 2020.
-
- [18] „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 6: Räumliche Auswirkungen**.“, Bern, 2020.
-
- [19] „**KoMoD - Kooperative Mobilität im digitalen Testfeld Düsseldorf, Use Cases im Überblick**.“, 2019.
-
- [20] D. J. Fagnant und K. Kockelman, „**Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations**“, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Bd. 77, S. 167–181, Juli 2015, doi: 10.1016/j.tra.2015.04.003.
-
- [21] Z. Wadud, D. MacKenzie, und P. Leiby, „**Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles**“, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Bd. 86, S. 1–18, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.tra.2015.12.001.
-
- [22] C. J. Haboucha, R. Ishaq, und Y. Shiftan, „**User preferences regarding autonomous vehicles**“, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Bd. 78, S. 37–49, Mai 2017, doi: 10.1016/j.trc.2017.01.010.
-
- [23] Y. Shen, H. Zhang, und J. Zhao, „**Integrating shared autonomous vehicle in public transportation system: A supply-side simulation of the first-mile service in Singapore**“, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Bd. 113, S. 125–136, Juli 2018, doi: 10.1016/j.tra.2018.04.004.
-
- [24] M. Makridis, K. Mogno, B. Ciuffo, und G. Fontaras, „**The impact of automation and connectivity on traffic flow and CO2 emissions. Adetailed microsimulation study**.“, Nr. Atmospheric Environment 226, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117399>
-
- [25] K. Mattas u. a., „**Fuzzy Surrogate Safety Metrics for real-time assessment of rear-end collision risk. A study based on empirical observations**“, Accident Analysis & Prevention, Bd. 148, S. 105794, Dez. 2020, doi: 10.1016/j.aap.2020.105794.
-

-
- [26] M. Makridis, L. Lequerc, K. Mattas, und B. Ciuffo, „**The impact of driving homogeneity due to automation and cooperation of vehicles on uphill freeway sections.**“, *European Transport Research Review*, 2020, [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00407-9>
-
- [27] ASTRA, „**Tunnelsicherheit bezüglich Selbstrettung TUSI 2019**“, ASTRA, S244-1411, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.alptransit-portal.ch/Storages/User//Meilensteine/Pin_092/Dokumente_092/OK-092_Tunnelsicherheit_und_Selbstrettung_30._Juni_2010_ASTRA.pdf
-
- [28] A. Erath, E. Löchl, und K. W. Axhausen, „**Graph-Theoretical Analysis of the Swiss Road and Railway Networks Over Time**“, *Networks and Spatial Economics*, Bd. 9, S. 379–400, 2009.
-
- [29] B. Ciuffo u. a., „**Requiem on the positive effects of commercial adaptive cruise control on motorway traffic and recommendations for future automated driving systems**“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 130, S. 103305, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.trc.2021.103305.
-
- [30] ASTRA, „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Erkenntnisse und Massnahmen aus Sicht des ASTRA**“, ASTRA, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/projects/astra-2018-002/ab1578-0.pdf>
-
- [31] C. M. Rudin-Brown, K. L. Young, C. Patten, M. G. Lenné, und R. Ceci, „**Driver distraction in an unusual environment: Effects of text-messaging in tunnels**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 50, S. 122–129, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.aap.2012.04.002.
-
- [32] C. Nussbaumer, „**COMPARATIVE ANALYSIS OF SAFETY IN TUNNELS**“, undefined, 2007, Zugegriffen: 6. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.semanticscholar.org/paper/COMPARATIVE-ANALYSIS-OF-SAFETY-IN-TUNNELS-Cornelia-Board/07637e882f31873daad4e1dac92751581a18a00e>
-
- [33] K. Kircher und C. Ahlstrom, „**The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 47, S. 153–161, Juli 2012, doi: 10.1016/j.aap.2012.01.019.
-
- [34] H. Huang, Y. Peng, J. Wang, Q. Luo, und X. Li, „**Interactive risk analysis on crash injury severity at a mountainous freeway with tunnel groups in China**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 111, S. 56–62, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.aap.2017.11.024.
-
- [35] S. Jung und X. Qin, „**A data-driven approach to strengthening policies to prevent freeway tunnel strikes by motor vehicles**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 157, S. 106171, Juli 2021, doi: 10.1016/j.aap.2021.106171.
-
- [36] X. Zhao, Y. Ju, H. Li, C. Zhang, und J. Ma, „**Safety of Raised Pavement Markers in Freeway Tunnels Based on Driving Behavior**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 145, S. 105708, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.aap.2020.105708.
-
- [37] F. Chen, H. Peng, X. Ma, J. Liang, W. Hao, und X. Pan, „**Examining the safety of trucks under crosswind at bridge-tunnel section: A driving simulator study**“, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Bd. 92, S. 103034, Okt. 2019, doi: 10.1016/j.tust.2019.103034.
-
- [38] S. Chen und F. Chen, „**Simulation-Based Assessment of Vehicle Safety Behavior under Hazardous Driving Conditions**“, *Journal of Transportation Engineering*, Bd. 136, Nr. 4, Art. Nr. 4, Apr. 2010, doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000093.
-
- [39] U. Ahmed und M. Cetin, „**Impacts of heavy vehicles on inter-vehicle interactions and passenger car equivalents for tunnel traffic**“, *Case Studies on Transport Policy*, Bd. 5, Nr. 4, Art. Nr. 4, Dez. 2017, doi: 10.1016/j.cstp.2017.08.005.
-
- [40] C. Caliendo, M. L. De Guglielmo, und M. Guida, „**A crash-prediction model for road tunnels**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 55, S. 107–115, Juni 2013, doi: 10.1016/j.aap.2013.02.024.
-
- [41] Q. Hou, A. P. Tarko, und X. Meng, „**Analyzing crash frequency in freeway tunnels: A correlated random parameters approach**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 111, S. 94–100, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.aap.2017.11.018.
-
- [42] U. Salvisberg, R. Allenbach, M. Cavegn, M. Hubacher, und S. Siegrist, „**Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes**“, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung, Jan. 2004. Zugegriffen: 21. April 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/193067/?clsId0=2784&clsId1=2678&clsId2=2682&clsId3=4572>
-
- [43] F. H. Amundsen und G. Ranes, „**Studies on traffic accidents in Norwegian road tunnels**“, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Bd. 15, Nr. 1, Art. Nr. 1, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0886-7798(00)00024-9.
-
- [44] J. S. Yeung und Y. D. Wong, „**Road traffic accidents in Singapore expressway tunnels**“, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Bd. 38, S. 534–541, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.tust.2013.09.002.
-
- [45] X. Fu, S. He, J. Du, X. Wang, und T. Ge, „**Variations in Naturalistic Driving Behavior and Visual Perception at the Entrances of Short, Medium, and Long Tunnels**“, *Journal of Advanced Transportation*, Bd. 2020, S. e7630681, Feb. 2020, doi: 10.1155/2020/7630681.
-

-
- [46] Y. Hu, H. Liu, und T. Zhu, „**Influence of spatial visual conditions in tunnel on driver behavior: Considering the route familiarity of drivers**“, *Advances in Mechanical Engineering*, Bd. 11, Nr. 5, Art. Nr. 5, Mai 2019, doi: 10.1177/1687814019853661.
-
- [47] Z. Li, G. Xing, X. Zhao, und H. Li, „**Impact of the connected vehicle environment on tunnel entrance zone**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 157, S. 106145, Juli 2021, doi: 10.1016/j.aap.2021.106145.
-
- [48] A. Pervez, H. Huang, C. Han, J. Wang, und Y. Li, „**Revisiting freeway single tunnel crash characteristics analysis: A six-zone analytic approach**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 142, S. 105542, Juli 2020, doi: 10.1016/j.aap.2020.105542.
-
- [49] E. Commission, „**Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network**“, Apr. 2004. Zugegriffen: 6. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/54/oj/eng>
-
- [50] L. M. Gil-Martín, A. Gómez-Guzmán, und A. Peña-García, „**Use of diffusers materials to improve the homogeneity of sunlight under pergolas installed in road tunnels portals for energy savings**“, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Bd. 48, S. 123–128, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.tust.2015.03.001.
-
- [51] L. Qin, L.-L. Dong, W.-H. Xu, L.-D. Zhang, und A. S. Leon, „**An Intelligent Luminance Control Method for Tunnel Lighting Based on Traffic Volume**“, *Sustainability*, Bd. 9, Nr. 12, Art. Nr. 12, Dez. 2017, doi: 10.3390/su9122208.
-
- [52] SAFESTAR, „**Safety Standards for Road Design and Redesign**“, RO-96-SC.203, 2002. Zugegriffen: 21. April 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/safestarrep.pdf>
-
- [53] P. Slop, „**SAFETY EFFECTS OF ROAD DESIGN STANDARDS**“, ROAD SAFETY IN EUROPE AND STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (SHRP), LILLE, FRANCE, SEPTEMBER 26-28, 1994 (VTI KONFERENS), Nr. 2A:2, Art. Nr. 2A:2, 1995, Zugegriffen: 6. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://trid.trb.org/view/464507>
-
- [54] K. Lemke, „**Road Safety in Tunnels**“, *Transportation Research Record*, Bd. 1740, Nr. 1, Art. Nr. 1, Jan. 2000, doi: 10.3141/1740-22.
-
- [55] S. Bassan, „**Overview of traffic safety aspects and design in road tunnels**“, *IATSS Research*, Bd. 40, Nr. 1, Art. Nr. 1, Juli 2016, doi: 10.1016/j.iatssr.2016.02.002.
-
- [56] X. Chang, H. Li, J. Rong, L. Qin, und X. Zhao, „**Spatiotemporal Characteristics of Vehicle Trajectories in a Connected Vehicle Environment—A Case of an Extra-Long Tunnel Scenario**“, *IEEE Systems Journal*, Bd. 15, Nr. 2, Art. Nr. 2, Juni 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.2990650.
-
- [57] X. Chang, J. Rong, H. Li, Y. Wu, und X. Zhao, „**Impact of connected vehicle environment on driving performance: A case of an extra-long tunnel scenario**“, *IET Intelligent Transport Systems*, Bd. 15, Nr. 3, Art. Nr. 3, 2021, doi: 10.1049/itr2.12035.
-
- [58] D. Lord und F. Mannering, „**The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives**“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 44, Nr. 5, Art. Nr. 5, Juni 2010, doi: 10.1016/j.tra.2010.02.001.
-
- [59] F. L. Mannering und C. R. Bhat, „**Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions**“, *Analytic Methods in Accident Research*, Bd. 1, S. 1–22, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.amar.2013.09.001.
-
- [60] P. T. Savolainen, F. L. Mannering, D. Lord, und M. A. Quddus, „**The statistical analysis of highway crash-injury severities: A review and assessment of methodological alternatives**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 43, Nr. 5, Art. Nr. 5, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.aap.2011.03.025.
-
- [61] F. L. Mannering, V. Shankar, und C. R. Bhat, „**Unobserved heterogeneity and the statistical analysis of highway accident data**“, *Analytic Methods in Accident Research*, Bd. 11, S. 1–16, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.amar.2016.04.001.
-
- [62] C. Caliendo, M. L. De Guglielmo, und I. Russo, „**Analysis of crash frequency in motorway tunnels based on a correlated random-parameters approach**“, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Bd. 85, S. 243–251, März 2019, doi: 10.1016/j.tust.2018.12.012.
-
- [63] G. Fountas, P. Ch. Anastasopoulos, und M. Abdel-Aty, „**Analysis of accident injury-severities using a correlated random parameters ordered probit approach with time variant covariates**“, *Analytic Methods in Accident Research*, Bd. 18, S. 57–68, Juni 2018, doi: 10.1016/j.amar.2018.04.003.
-
- [64] G. Fountas, M. T. Sarwar, P. Ch. Anastasopoulos, A. Blatt, und K. Majka, „**Analysis of stationary and dynamic factors affecting highway accident occurrence: A dynamic correlated grouped random parameters binary logit approach**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 113, S. 330–340, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.aap.2017.05.018.
-
- [65] T. U. Saeed, T. Hall, H. Baroud, und M. J. Volovski, „**Analyzing road crash frequencies with uncorrelated and correlated random-parameters count models: An empirical assessment of multilane highways**“, *Analytic Methods in Accident Research*, Bd. 23, S. 100101, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.amar.2019.100101.
-

- [66] K. Kazaras, K. Kiriopoulou, und A. Rentizelas, „**Introducing the STAMP method in road tunnel safety assessment**“, *Safety Science*, Bd. 50, Nr. 9, Art. Nr. 9, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.ssci.2012.04.013.
- [67] J. Törnros, „**Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel—a validation study**“, *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 30, Nr. 4, Art. Nr. 4, Juli 1998, doi: 10.1016/S0001-4575(97)00099-7.
- [68] A. Calvi, M. R. De Blasiis, und C. Guattari, „**An Empirical Study of the Effects of Road Tunnel on Driving Performance**“, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Bd. 53, S. 1098–1108, Okt. 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.959.
- [69] J. Xu u. a., „**Physiological indices and driving performance of drivers at tunnel entrances and exits: A simulated driving study**“, *PLOS ONE*, Bd. 15, Nr. 12, Art. Nr. 12, Dez. 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0243931.
- [70] R. Alonso u. a., „**The future of road transport.**“, Joint Ressearch Center (Sevilla site), 2019.
- [71] K. Mattas u. a., „**Fuzzy Surrogate Safety Metrics for realtime assessment of rear-end collision risk. A study based on empirical observations.**“, *Accident Analysis & Prevention*, Nr. 148, 105794, [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105794>
- [72] M. Makridis, L. Leclercq, K. Mattas, und B. Ciuffo, „**The impact of driving homogeneity due to automation and cooperation of vehicles on uphill freeway sections.**“, *European Transport Research Review*, Bd. 12(1), 15, [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00407-9>
- [73] Y. He, M. Makridis, K. Mattas, G. Fontaras, B. Ciuffo, und H. Xu, „**Introducing Electric Vehicle Dynamics in Traffic Simulation**“, *Transportation Research Record*, 2020, doi: 10.1177/0361198120931842.
- [74] Y. He, M. Makridis, G. Fontaras, K. Mattas, H. Xu, und B. Ciuffo, „**The energy impact of adaptive cruise control in real-world highway multiple-car-following scenarios.**“, *European Transport Research Review*, 12(1), 17., 2020, [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00406-w>
- [75] M. Batty u. a., „**Smart cities of the future**“, *The European Physical Journal Special Topics*, Bd. 214, Nr. 1, Art. Nr. 1, Nov. 2012, doi: 10.1140/epjst/e2012-01703-3.
- [76] Y. He u. a., „**Adaptive Cruise Control Strategies Implemented on Experimental Vehicles: A Review.**“, *IFAC-PapersOnLine*, Bd. 52(5), S. 21-27., 2019, [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.004>
- [77] SAE, „**Taxonomy and Definitions for Terms Related to Cooperative Driving Automation for On-Road Motor Vehicles**“, SAE International, Juli 2021, doi: https://doi.org/10.4271/J3216_202107.
- [78] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, **Handbook of Driver Assistance Systems**. 2016. Zugegriffen: 11. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-12352-3>
- [79] F. Fang und Z. Ding, „**High Precision Positioning and Accident Detection System for Vehicles in Traffic Tunnel**“, in 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), Jan. 2019, S. 419–425. doi: 10.1109/ICEICT.2019.8846435.
- [80] M. N. Sharath und B. Mehran, „**A Literature Review of Performance Metrics of Automated Driving Systems for On-Road Vehicles**“, *Frontiers in Future Transportation*, Bd. 2, 2021, Zugegriffen: 21. April 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/ffutr.2021.759125>
- [81] X. Dai, X. Yuan, und X. Wei, „**TIRNet: Object detection in thermal infrared images for autonomous driving**“, *Applied Intelligence*, Bd. 51, Nr. 3, Art. Nr. 3, März 2021, doi: 10.1007/s10489-020-01882-2.
- [82] C. Cadena u. a., „**Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age**“, *IEEE Transactions on Robotics*, Bd. 32, Nr. 6, Art. Nr. 6, Dez. 2016, doi: 10.1109/TRO.2016.2624754.
- [83] C. Chen, A. Seff, A. Kornhauser, und J. Xiao, „**DeepDriving: Learning Affordance for Direct Perception in Autonomous Driving**“, in 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Dez. 2015, S. 2722–2730. doi: 10.1109/ICCV.2015.312.
- [84] M. Cordts u. a., „**The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding**“, in 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Juni 2016, S. 3213–3223. doi: 10.1109/CVPR.2016.350.
- [85] A. Geiger, P. Lenz, und R. Urtasun, „**Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite**“, in 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Juni 2012, S. 3354–3361. doi: 10.1109/CVPR.2012.6248074.
- [86] H. Qin, Y. Peng, und W. Zhang, „**Vehicles on RFID: Error-Cognitive Vehicle Localization in GPS-Less Environments**“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 66, Nr. 11, Art. Nr. 11, Nov. 2017, doi: 10.1109/TVT.2017.2739123.
- [87] W. Schwarting, J. Alonso-Mora, und D. Rus, „**Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles**“, *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, Bd. 1, Nr. 1, Art. Nr. 1, 2018, doi: 10.1146/annurev-control-060117-105157.
- [88] R. Toledo-Moreo, M. A. Zamora-Izquierdo, B. Ubeda-Minarro, und A. F. Gomez-Skarmeta, „**High-Integrity IMM-EKF-Based Road Vehicle Navigation With Low-Cost GPS/SBAS/INS**“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Bd. 8, Nr. 3, Art. Nr. 3, Sep. 2007, doi: 10.1109/TITS.2007.902642.

- [89] S. Herman und O. Carsten, „**What Does My Car Do?**“, Parliamentary Advisory Council For Transport Safety, 2019. Zugegriffen: 11. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.carsdirect.com/auto-loans/what-does-it-mean-to-be-a-reference-for-someone-buying-a-car>
- [90] H. Wu und S. Malipeddi, „**Influential factors for severe traffic crashes**“, in Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Juli 2011, S. 71–75. doi: 10.1109/ICVES.2011.5983749.
- [91] Y.-D. Kim, G.-J. Son, C.-H. Song, und H.-K. Kim, „**On the Deployment and Noise Filtering of Vehicular Radar Application for Detection Enhancement in Roads and Tunnels**“, Sensors, Bd. 18, Nr. 3, Art. Nr. 3, März 2018, doi: 10.3390/s18030837.
- [92] I. J. Xique, W. Buller, Z. B. Fard, E. Dennis, und B. Hart, „**Evaluating Complementary Strengths and Weaknesses of ADAS Sensors**“, in 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Aug. 2018, S. 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2018.8690901.
- [93] T. Schamm, C. von Carlowitz, und J. M. Zöllner, „**On-road vehicle detection during dusk and at night**“, in 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Juni 2010, S. 418–423. doi: 10.1109/IVS.2010.5548013.
- [94] Mercedes-Benz, „**Introducing DRIVE PILOT: An Automated Driving System for the Highway**“, Mercedes-Benz, Self-assessment, 2022.
- [95] B. D. Seppelt und J. D. Lee, „**Making adaptive cruise control (ACC) limits visible**“, International Journal of Human-Computer Studies, Bd. 65, Nr. 3, Art. Nr. 3, März 2007, doi: 10.1016/j.ijhcs.2006.10.001.
- [96] H. Atasayar, M. Deublein, J. Zimmermann, und F. Schneider, „**Zuverlässigkeit von Notbremsassistenten zum Schutz von ungeschützten Verkehrsteilnehmer*innen - Versuchsdokumentation** - BFU“, Wien/Bern, 2021. Zugegriffen: 11. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.readkong.com/page/zuverlassigkeit-von-notbremsassistenten-zum-schutz-von-8605559>
- [97] H. Kim und B. Song, „**Vehicle recognition based on radar and vision sensor fusion for automatic emergency braking**“, in 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013), Okt. 2013, S. 1342–1346. doi: 10.1109/ICCAS.2013.6704164.
- [98] F. Re, A. Kriston, D. Broggi, und F. Minarini, „**Testing the Robustness of Commercial Lane Departure Warning Systems**“, Transportation Research Record, Bd. 2675, Nr. 12, Art. Nr. 12, Dez. 2021, doi: 10.1177/03611981211029646.
- [99] F. Tarada, „**Safety of Innovative Vehicles in Tunnels**“, MOSEN, Feb. 2017. Zugegriffen: 6. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://mosen.global/2017/02/safety-innovative-vehicles-tunnels-2/>
- [100] R. Kunc, S. Omerović, M. Ambrož, und I. Prebil, „**Comparative study of European tunnel emergency-stop-area-wall protection measures**“, Accident Analysis & Prevention, Bd. 63, S. 9–21, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.aap.2013.10.020.
- [101] J. C. F. de Winter, R. Happee, M. H. Martens, und N. A. Stanton, „**Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence**“, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Bd. 27, S. 196–217, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.trf.2014.06.016.
- [102] S. Ghanem, P. Kanungo, G. Panda, S. C. Satapathy, und R. Sharma, „**Lane detection under artificial colored light in tunnels and on highways: an IoT-based framework for smart city infrastructure**“, Complex & Intelligent Systems, Mai 2021, doi: 10.1007/s40747-021-00381-2.
- [103] E. Beheshtitabar, M. Cetin, und G. List, „**Impacts of Downstream Observability on the Traffic Performance within a Tunnel**“, S. 291–302, Aug. 2019, doi: 10.1061/9780784482575.028.
- [104] Y. Li, Z. Li, H. Wang, W. Wang, und L. Xing, „**Evaluating the safety impact of adaptive cruise control in traffic oscillations on freeways**“, Accident Analysis & Prevention, Bd. 104, S. 137–145, Juli 2017, doi: 10.1016/j.aap.2017.04.025.
- [105] G. Sala, R. Brignolo, E. Carrubba, U. Jallasse, D. Shinar, und B. Mayer, „**Improvement of accident prevention in road tunnels through Intelligent Infrastructures and Intelligent Vehicles cooperation**“, 2003. Zugegriffen: 22. April 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.semanticscholar.org/paper/Improvement-of-accident-prevention-in-road-tunnels/f31b8d6947c03337114f6b65d0b539a185e4b04e>
- [106] „**World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29)**“. Zugegriffen: 19. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://unece.org/transport/vehicle-regulations/world-forum-harmonization-vehicle-regulations-wp29>
- [107] „UN Regulation No. 157 - **Automated Lane Keeping Systems (ALKS)**“.
- [108] **3D-Video ASTRA**; <https://3dvideo.astra.admin.ch/latest/>, (April 2023).
- [109] „**Erhaltungsplanung und Arbeitsprozesse und Produkte**“, Bundesamt für Strassen (ASTRA), 2016.
- [110] „**Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen**“, Bundesamt für Strassen (ASTRA), 2014.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 02.08.2023

Grunddaten

Projekt-Nr.: BGT_20_09A_01
Projekttitel: Automatisiertes Fahren im Strassentunnel – Chancen, Risiken und ideale Strecken
Enddatum: 04.08.2023

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Selbstfahrende intelligente Fahrzeuge bringen ein neues Fahrverhalten in die Strassenverkehrssysteme ein. Noch gibt es für solche Systeme keine standardisierten Betriebsmerkmale und Erfahrungswerte aus der Praxis, was Bedenken hinsichtlich ihrer Sicherheit und ihrer künftigen Auswirkungen auf den Verkehr insbesondere Mischverkehr. Darüber hinaus ist das Verhalten automatisierter Fahrzeuge unter bestimmten Infrastrukturbedingungen, wie z. B. in Tunneln und bei ungünstigen Wetterbedingungen, noch unklar. Während die Sicherheit und Effizienz des Fahrens in Tunneln derzeit mit Faktoren wie Ablenkung des Fahrers, Beleuchtung und Verkehrsfluss in Verbindung gebracht werden, stellt die Einführung hochautomatisierter Fahrzeuge eine grosse Herausforderung für das Verständnis ihrer Auswirkungen auf die Tunnelsicherheit dar. Die heute für das automatisierte Fahren verwendeten Sensoren wie Kameras, LiDARs und Radare zeigen unter realen Bedingungen einen erheblichen Leistungsabfall, und es werden massgeschneiderte Testverfahren für ADAS benötigt, um den ordnungsgemässen Betrieb autonomer Fahrzeuge zu gewährleisten. Die Modernisierung von Tunneln zur Unterstützung automatisierter Fahrzeuge ist notwendig, einschliesslich geeigneter Lichtverhältnisse, Unfallerkennungsverfahren, Kommunikationsinfrastrukturen und klarer Fahrbahnmarkierungen. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde die Hypothese, dass «Tunnel auf Hochleistungsstrassen prädestinierte Infrastrukturen zur Förderung des hoch- und vollautomatisierten Fahrens sind» bestätigt. Es wurden Auswahlkriterien für Tunnel erarbeitet und verwendet, um am Ende 23 Tunneln als Teststrecken für automatisiertes Fahren vorzuschlagen. Offen bleibt die Frage, welche flankierenden Massnahmen noch getroffen werden müssen, um Tests mit automatisierten Fahrzeugen im realen Verkehrsbetrieb mit Mischverkehr durchzuführen.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Hypothese:

"Tunnel auf Hochleistungsstrassen sind prädestinierte Infrastrukturen zur Förderung des hoch- und vollautomatisierten Fahrens".

Ziel der Studie:

Das übergeordnete Ziel dieser Studie ist die Schaffung einer Entscheidungsgrundlage, um das automatisierte Fahren in Nationalstrassentunneln in technischer und betrieblicher Hinsicht unter Berücksichtigung der Tunnelsicherheitsvorgaben zu ermöglichen.

Schritt 1 Stand der Forschung und Technik: Beschreiben des Stand der Forschung anhand einer internationalen Literaturrecherche erfolgte

Schritt 2 Anforderungen an Strassentunnel: Erhebung der Kriterien mittels Experten Workshop und Fragebogen (Eigenschaften der Infrastruktur, insbesondere der BSA, aber auch angepasste Betriebsprozesse) erfolgte.

Schritt 3 Beurteilungskriterien: Herleitung von Beurteilungskriterien für Strassentunnel, welche geeignet sind, um automatisiertes Fahren zu testen. Kriterienkatalog gegliedert nach «Sicherheit», «Technik» und «Betrieb» erstellt.

Schritt 4 Hypothesenüberprüfung und Objektliste Kriterienkatalog in die Praxis übertragen und ideale Tunnelprojekte auf dem Nationalstrassennetz bestimmen. Hypothese hat sich bestätigt, es wurde eine Objektliste mit 23 potentiell geeigneten Tunnel erstellt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Fachwelt scheint sich einig zu sein, dass Tunnel des Nationalstrassennetzes im Vergleich zu offenen Strecken eher sicherer sind. Hinzu kommt, dass innerhalb von Tunnel die Umweltbedingungen konstanter scheinen, was die Funktion der Sensorik positiv beeinflussen sollte. Auf der negativen Seite ist weiterhin unklar, welche Beschaffenheit der Tunnelwände zu Reflexionen führen und unter welchen Umständen die verschiedenen Sensoren Leistungseinbussen aufweisen. Es braucht Tests unter realen Bedingungen: Sinnvollerweise werden derartige Tests zuerst auf abgesperrten Strecken durchgeführt. In der Gewissheit, dass wir in den kommenden 10-30 Jahren Mischverkehr auf unseren Strassen antreffen werden, brauchen wir experimentelle Daten zum Verhalten von automatisierten Fahrzeugen im Mischverkehr. Als Teststrecken scheinen sich in der Tat Tunnel anzubieten

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: van Linn

Vorname: Andreas

Amt, Firma, Institut: Amstein + Walthert Progress AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Begleitkommission wurde in den Forschungsprozess eingebunden und lieferte insbesondere bei der Erstellung des Expertenfragebogens einen wesentlichen Beitrag. Zusätzlich konnte im Rahmen der Forschungsarbeit das Netzwerk der Begleitkommission genutzt werden. Es wurden 4 BK Sitzungen unter der Leitung von Dominique Morel durchgeführt mit denen das Budget überwacht und die Termineinhaltung kontrolliert wurden. Der Forschungsbericht wurde termingerecht eingereicht.

Umsetzung:

Die Umsetzung des Forschungsgesuchs mit einem wissenschaftlichen fundierten Vorgehen, Hypothesenformulierung und Überprüfung der Hypothese mittels Literaturübersicht und Expertenbefragungen wurde korrekt durchgeführt und lieferte fundierte Ergebnisse. Das Forschungsprojekt lieferte KPI's für die Auswahl von geeigneten Tunnel. Es wurde eine Liste mit 23 Tunnels erstellt, welche die Auswahlkriterien erfüllen. Das Projekt liefert eine Liste von potentiellen, für Test geeignete Tunnels. Ob in den Tunnels dann Test durchgeführt werden können, liegt in der Verantwortung und dem Ermessen und der Zustimmung des ASTRA in Zusammenarbeit mit der zuständigen Filiale als Betreiber. Die Machbarkeit hängt vor allem von den politischen Rahmenbedingungen und den geographische/verkehrstechnischen Lage ab. Weiter sind die in den nächsten Monaten und Jahren geplanten Wartungs- respektive Umbauarbeiten zu berücksichtigen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die Analyse des aktuellen Forschungsstandes zeigt, dass das Verhalten automatisierter Fahrzeuge in Tunnels noch unklar ist. Computersimulationen allein reichen nicht aus, um das Fahrverhalten von selbstfahrenden Autos zu verstehen. Dies liegt unter anderem daran, dass vorhandene Fahrzeugsensoren unter verschiedenen Umweltbedingungen erhebliche Leistungseinbußen aufweisen können. Daher sind standardisierte Testbedingungen in Tunnels erforderlich. Es bleibt jedoch unklar, welche Tunnelbeschaffenheit Reflexionen verursachen kann und unter welchen Umständen Sensoren beeinträchtigt werden. Daher sind Tests unter realen Bedingungen notwendig. Die Entwicklung von Testprotokollen und einer standardisierten Messmethodik zur Bewertung der Sensoren wird wahrscheinlich Gegenstand zukünftiger Forschungsprojekte sein.

Einfluss auf Normenwerk:

Im Projekt gibt es Hinweise, dass die Kommunikatin Fz zu FZ und Fz zu Infrastruktur standardisiert werden sollten. Weiter wurde deutlich, dass die Messung der Sensorleistung in Tunnels ebenfalls einer Standardisierung bedarf.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Morel

Vorname: Dominique

Amt, Firma, Institut: AXIS Communications GmbH

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Dominique Morel