Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transport, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle communication DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Mindestanforderungen an die Infrastruktur für vernetzte, bedingt- und hochautomatisierte Fahrzeuge

Minimum infrastructure requirements for connected, conditionally and highly automated vehicles

Exigences minimales en matière d'infrastructure pour les véhicules connectés, conditionnellement et hautement automatisés

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

ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT
Dr. Anastasios Kouvelas
Dr. Michail Makridis
Dr. Yifang Zhan

Forschungsprojekt MB4_20_05E_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe Mobilität 4.0 (MB4)
September 2025 | 1802

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)

Mindestanforderungen an die Infrastruktur für vernetzte, bedingt- und hochautomatisierte Fahrzeuge

Minimum infrastructure requirements for connected, conditionally and highly automated vehicles

Exigences minimales en matière d'infrastructure pour les véhicules connectés, conditionnellement et hautement automatisés

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

ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT
Dr. Anastasios Kouvelas
Dr. Michail Makridis
Dr. Yifang Zhan

Forschungsprojekt MB4_20_05E_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe Mobilität 4.0 (MB4)
September 2025 | 1802

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Dr. Andreas van Linn

Mitglieder
Dr. Reto Schneider (AWP)
Michael Häberling (AWP)
Dr. Anastasios Kouvelas (IVT ETHZ)
Dr. Michail Makridis (IVT ETHZ)
Dr. Yifang Zhang (IVT ETHZ)
Marco Zbinden (AWP)
Stephen Lingwood (AWP)

Federführende Fachkommission

Arbeitsgruppe Mobilität 4.0 (MB4)

Begleitkommission

Präsident
Dominique Morel (AXIS Communications)

Mitglieder
Sigrid Pirkelbauer (ASTRA)
Markus Eisenlohr (ASTRA)
Thomas Sauter Servas (ZHAW)
Arnd Koenig (VP ZH)
Christoph Zeier (AMAG)
Bernhard Gerster
Christoph Tschudin (Yunex)

Antragsteller

Arbeitsgruppe Mobilität 4.0 (MB4)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von
https://www.mobilityplatform.ch/
heruntergeladen werden.

September 2025

Inhaltsverzeichnis

Impressum **4**

Abbildungsverzeichnis **8**

Tabellenverzeichnis **9**

Abkürzungsverzeichnis **9**

Zusammenfassung **12**

Summary **14**

Résumé **16**

1 Einleitung **19**
1.1 Ausgangslage 19
1.2 Erwartete Vorteile der intelligenten Verkehrssysteme 19
1.3 Ziele des Forschungsprojektes 20
1.4 Abgrenzung 21
1.5 Vorgehen 22
1.5.1 Vorgehensplan 22
1.5.2 Arbeitsschritte 22

2 Internationaler Stand der Forschung **23**
2.1 Einleitung 23
2.2 Grundlagen für Autonomes Fahren 24
2.2.1 Kategorisierung Autonomer Fahrzeuge und Sensoren 24
2.2.2 Strasseninfrastruktur in Europa 28
2.2.3 Fahrzeug Netzwerk 29
2.2.4 Europäische Gesetzgebung 32
2.2.5 Eidgenössische Aktivitäten 33
2.3 Limitationen für individuelle autonome Fahrzeuge 36
2.3.1 Wahrnehmung/Sensor Module 37
2.3.2 Lokalisierungs Modul 38
2.3.3 Planungsmodul 39
2.3.4 Steuermodul 41
2.4 Wie hilft V2X autonomen Fahrzeugen? 41
2.4.1 SAE-Automatisierungsstufen und V2X-Integration 42
2.4.2 Verbesserung für AVs 42
2.4.3 Wahrnehmungsmodul 42
2.4.4 Lokalisierungsmodul 43
2.4.5 Planungsmodul 43
2.5 Operational Design Domain für Infrastruktur 45
2.6 Roadside Devices / Geräte am Strassenrand (RSD) 50
2.6.1 Elektronische Geräte, Installationen 54

2.6.2 Kommunikationsgeräte 54
2.7 Kommunikationsprotokolle und -dienste 55
2.7.1 V2X-Protokolle 55
2.7.2 Datenkommunikationsdienst 57
2.7.3 Cybersicherheitsprobleme bei V2X 58
2.8 Aktuelle Entwicklung und Testumgebung in EU-Ländern 59
2.9 Erkenntnisse aus Pilotprojekten zu V2I aus der Schweiz 61
2.10 Herausforderungen bei der Bereitstellung der Infrastruktur in der Schweiz 61

3 Operational Design Domain für Infrastruktur 64
3.1 Sokrates Karte in Anlehnung an ISO 34503 64
3.1.1 Zusammenfassung der Strassenkategorien 66
3.1.2 Spezifische ODD für Hochleistungsstrassen, Landstrassen und städtische Strassen 66
3.2 Mobilitätsszenarien 73
3.2.1 Szenario I: Maximale Vernetzung von Fahrzeugen mit der Verkehrsinfrastruktur 73
3.2.2 Szenario II: Beschränkte minimale Vernetzung von Fahrzeugen innerhalb der gleichen Marke 74
3.2.3 Vergleich und Prognose der Szenarienentwicklung 75
3.2.4 ODD Management 77

4 Kommunikation V2X 79
4.1 Infrastruktur und Kommunikation 79
4.2 Datenintegrität 79
4.3 Hochauflösende Karten und Echtzeitinformationen 79
4.4 GPS/GNSS: Fundament jeder Automatisierung 81
4.5 Kommunikationstechnologien und Standardisierung 81
4.6 Roadside Units (RSU) und ihr Potenzial 81
4.7 Alternativen zur On Board Unit (OBU) und kommerzielle Interessen 81
4.8 Rolle von KI und kommunaler Infrastruktur 82
4.9 Prüfung und Qualitätssicherung 82
4.10 Herausforderungen bei der Interpretation von Sensordaten im autonomen Fahren 82

5 Mindestanforderungen an die Infrastruktur 84
5.1 Sicherheit 85
5.1.1 Maschinenlesbare Signalisation 85
5.1.2 Redundante Systeme 85
5.1.3 Barrierefreiheit 86
5.2 Technik 86
5.2.1 V2X-Kommunikation 86
5.2.2 Sensorfusion 86
5.2.3 Edge Computing 86

5.3 Betrieb 86
5.3.1 Echtzeit-Datenaktualisierung 86
5.3.2 Wartungsprotokolle 86
5.3.3 Interoperabilität 86
5.4 Infrastrukturbezogene Entwicklung 86
5.4.1 Digitalisierung der physischen Infrastruktur 87
5.4.2 Kommunikationsinfrastruktur (V2X / ITS-G5 / C-V2X / 5G/6G) 87
5.4.3 Sensorik & Edge-Intelligenz in der Infrastruktur 87
5.4.4 Zuverlässigkeit, Sicherheit & Cyberschutz 87
5.4.5 Infrastruktur als Datenquelle & Verkehrsmanager 88
5.4.6 Planerische & rechtliche Integration 88
5.4.7 Übergangsmanagement und Mixed-Traffic/Mischverkehr 88
5.4.8 Infrastruktur wird zum „Mitfahrer“ im Verkehrsfluss 88
5.4.9 Konkretisierte Massnahmen je Phase 89
5.4.10 Phasenunabhängige Massnahmen 89

6 Schlussfolgerung und Ausblick 90
6.1 Technische Entwicklung 90
6.2 Regulatorische Anforderungen 91
6.3 Infrastruktur: Ermöglichung oder Optimierung? 91
6.3.1 Mögliche Beiträge der Infrastruktur 91
6.4 Zukunftsvision: Open Data & neue Geschäftsmodelle 91
6.5 Gesamtgesellschaftlicher Nutzen & Inklusivität 92
6.6 Kooperativer intelligenter Verkehr: Realität, Herausforderungen und Perspektiven 93
6.7 Zusammenfassende Übersicht 94
6.8 Weiterer Forschungsbedarf 95
6.8.1 Interoperabilität & Standardisierung (insb. für Szenario I) 95
6.8.2 Datenschutz & Datensouveränität 95
6.8.3 Wirtschaftliche Anreizmodelle & Geschäftsmodelle 96
6.8.4 Nutzerakzeptanz und Verhalten 96
6.8.5 Resilienz & Cybersicherheit 96
6.8.6 Technologiebewertung & Wirkungsmessung 96
6.8.7 Übergangsszenarien & Mischbetrieb 96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehensplan 22
Abbildung 2: SAE-Level der Fahrautomatisierung. [15] 25
Abbildung 3: Verortung von gängigen Sensoren an der Fahrzeug Front und auf der Rückseite 26
Abbildung 4: Basis-Architektur eines typischen autonomen Fahrzeugs. [20] 27
Abbildung 5: Strassennetzwerk einiger EU-Länder [24]. 29
Abbildung 6: Kommunikationsszenarien für autonome Fahrzeuge [25] 30
Abbildung 7: V2I – Kommunikation mittels 5G [26] 31
Abbildung 8: Signal "Fahrzeuge mit einem Automatisierungssystem" 34
Abbildung 9: Die Mobilitätsdateninfrastruktur (MODI) im Mobilitätssystem (© BAV [37]) 35
Abbildung 10: Das Verkehrsnetz CH [39] 36
Abbildung 11: Erfassungsbereich und Anwendungsfälle verschiedener AV-Automobilradare [11] 37
Abbildung 12: Lokalisierungsmethoden [47] 39
Abbildung 13: Erzeugen eines gleichmässigen Vektors, der das Auto ans Ziel bringt [51] 40
Abbildung 14: Die Rolle von V2X in der Fahrzeugautomatisierung [56] 41
Abbildung 15: Stufen der Infrastrukturunterstützung für automatisiertes Fahren (ISAD-Stufen) [63] 48
Abbildung 16: Eine Illustration des Sensoreinsatzes am Mast [113]. 51
Abbildung 17: Sensorfähigkeiten LiDAR, Kamera, Radar [11] 53
Abbildung 18: Karte der grenzüberschreitenden 5G-Korridorinitiativen in Europa [155] 56
Abbildung 19: Teststandorte in EU Ländern: Übersicht [Google Maps] 59
Abbildung 20: Spezifikationen für Operational Design Domain für ADS; Blau markiert sind ODD Kriterien welche in den drei Fz Handbüchern verwendet wurden (nach ISO 34503, Klassifizierung ISO TC 22 2023) 65
Abbildung 21: Zusammenfassung der Strassenkategorien auf Basis Landestopographie 66
Abbildung 22: AV - Kenngrössen und Szenarien 76
Abbildung 23: Szenario I – maximale Vernetzung V2I 77
Abbildung 24: Szenario II – minimale Vernetzung V2I 77
Abbildung 25: Schema ODD Management[185] 77
Abbildung 26: Zusammenhänge der Kommunikation V2X – Schweiz 80
Abbildung 27: Zusammenspiel von ODD, ISAD Levels und Regulierung [187] 85
Abbildung 28: Darstellung verschiedener Rollen unabhängig von AV 92
Abbildung 29: Prinzip: Beispiel, Elemente für eine Realisierung von C-ITV Datenwegen 94
Abbildung 30: Graphische Zusammenfassung der Integration autonomer Fahrzeuge in ein künftiges Verkehrssystem 95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gängige Sensortypen 26
Tabelle 2: Anwendungen und Dienste, die durch V2X ermöglicht werden und verschiedene Module von AVs verbessern. 44
Tabelle 3: Merkmale der physischen Infrastruktur – nach Vorschlag von EU EIP & MANTRA [61] 47
Tabelle 4: Vergleich verschiedener Sensoren 51
Tabelle 5: Alle ODD Kriterien auf Basis der Norm ISO34503, mit einer Zuteilung der Relevanz für die 3 Kategorien Stadt/Innerorts, Land und Hochleistungsstrassen 73
Tabelle 6: Kenngrössen von Szenario I - Maximale Vernetzung von Fahrzeugen mit der Verkehrsinfrastruktur 74
Tabelle 7: Kenngrössen von Szenario II - Beschränkte minimale Vernetzung von Fahrzeugen innerhalb der gleichen Marke 74
Tabelle 8: Definition der ISAD-Stufen [63] 75
Tabelle 9: Vergleich und Entwicklungsprognose Szenario I und Szenario II 75
Tabelle 10: Übersicht Sensoren 82
Tabelle 11: Roadmap für Infrastruktur für autonomes Fahren 89
Tabelle 12: Zusatznutzen für ausgewählte Rollen 93

Abkürzungsverzeichnis

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ADS	Automated Driving Systems
AI	Artificial Intelligence
ATIS	Advanced Traveller Information System
AV	Autonomous vehicles
BeiDou	BeiDou Navigation Satellite System
C2C-CC	Car2Car Communication Consortium
CAM	Cooperative Awareness Message
CAN	Controller Area Network
CAV	Connected and Automated Vehicles
CEDR	Conference of European Directors of Roads
CEN	Comité Européen de Normalisation
C-ITS	Cooperative Intelligent Transport Systems
CNN	Convolutional Neural Network
C-V2X	Cellular V2X
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
DGPS	Differential Global Positioning System

DoS	Denial-of-Service
DP	Dynamic Programming
DSRC	Dedicated Short Range Communications
EKF	Extended Kalman Filter
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FSM	Finite State Machine
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMU	Inertial Measurement Unit, Inertial Measurement Unit
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
ISAD	Infrastructure Classification Scheme for Automated Driving
ITS	Intelligent Transport Systems
IVIM	In-Vehicle Information Message
IVS	Intelligente Verkehrssysteme
KI	Künstliche Intelligenz
LiDAR	Light Imaging, Detection and Ranging
LSA	Lichtsignalanlagen
MAC	Merchant Authorization Code
MEC	Mobile Edge Computing
MitM	Man-in-the-Middle
MPC	Model Predictive Control
MV	Mischverkehr
Nav IC	Navigation with Indian Constellation
OBU	On-Board-Units
ODD	Operational design domain
OEDR	Object and Event Detection and Response
OEM	Original Equipment Manufacturer
OTA	Over-the-Air
PID	Proportional-Integral-Differential
PKI	Public-Key-Infrastructure
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RRT	Rapidly-exploring Random Tree
RSD	Roadside Devices
RSU	Road Side Units
RTK	Real-time Kinematic positioning
SAAM	Swiss Association for Autonomous Mobility
SAE	Society of Automotive Engineers
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SPaTEM	Signal Phase and Timing Extended Message
SPATEM	Signal Phase and Timing Extended Message
TEN-V	Transeuropäische Verkehrsnetze
TMS	Transportation Management-System
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
V2I	Vehicle to Infrastructure

V2N	Vehicle to Network
V2P	Vehicle to Pedestrian
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to Everything
VMS	Variable Message Signs
VMZ	Verkehrsmanagementzentrale

Zusammenfassung

Die Einführung vernetzter, bedingt- und hochautomatisierter Fahrzeuge in der Schweiz wird in der kommenden Dekade erwartet. Während rechtliche Grundlagen im Aufbau sind, bleibt offen, ob die bestehende Strasseninfrastruktur genügt oder ob gezielte Anpassungen erforderlich werden und Mindestanforderungen an die Infrastruktur zu stellen sind. Insbesondere folgende Kernfragen wurden im Rahmen der Studie gestellt und beantwortet:

- Müssen sich automatisierte Fahrzeuge an bestehende Infrastruktur anpassen oder umgekehrt?
- Welche physischen und digitalen Infrastrukturkomponenten sind unverzichtbar?
- Welche Anforderungen an die Infrastruktur stellen sich in unterschiedlichen Betriebsumgebungen (ODD – Operational Design Domains)?

Das Vorgehen gliederte sich in vier Arbeitsschritte. Im Rahmen der Literaturrecherche wurde der internationale Stand der Forschung zu AV-Technologien, Sensorik, V2X-Kommunikation, EU- und CH-Regulierung dargelegt. Die ODD-Definition erfolgte zur Ermittlung relevanter Betriebsbedingungen für verschiedene Strassenkategorien (innerorts, ausserorts und Hochleistungsstrassen). Die Ergebnisse berücksichtigen die Beschreibung eines maximal vernetzten Szenarios im Vergleich zu einer minimalen Variante. Die Beschreibung der verwendeten Sensorik und Kommunikationsgeräte (V2X) diente als Abgrenzung und als Grundlage, um die Vorschläge von Mindestanforderungen an die Infrastruktur aus den Bereichen Sicherheit, Technik, Betrieb und Entwicklung herzuleiten. Dazu fanden Experteninterviews, Workshops und Szenariovergleiche statt.

Bei den Autonomiestufen (SAE 0-5) lag der Fokus auf den Stufen 3 und 4, mit zunehmender Systemverantwortung und sinkender Fahrerintervention. Bei der Sensorik wurde eine Kombination aus Kamera, LiDAR, Radar, Ultraschall, ergänzt durch IMU, GPS/GNSS und Fahrzeug internen Messsystemen betrachtet. Aufgefallen sind vor allem die Limitierungen u. a. bei schlechten Wetterbedingungen, die Abhängigkeit von einer hohen Signalabdeckung und die benötigte hohe Rechenleistung, welche ausserhalb des Fahrzeuges von zentralen Rechnern übernommen werden muss.

Im Bereich Kommunikation wurden u.a. V2V (Vehicle-to-Vehicle) zur Kollisionsvermeidung und Koordination; V2I (Vehicle-to-Infrastructure) bezüglich Ampelinformationen, Gefahrenwarnungen und dynamischer Verkehrssteuerung sowie V2P/V2N für Interaktionen mit Fussgängern und Netzdiensten analysiert. Augenscheinlich war die Erkenntnis, dass sich die Kommunikationstechnik auf eine noch lange anhaltende Mischverkehrssituation einstellen muss und dass die angebotenen Kommunikationsservices auch für den nicht automatisierten Verkehr bedeutende Sicherheits- und Effizienzgewinne bieten können.

Die Entwicklung wurde anhand von zwei unterschiedlichen Szenarien für den künftigen Ausbau der Strasseninfrastruktur betrachtet. Szenario I – maximale Vernetzung - beschreibt eine vollständige V2X-Kommunikation zwischen allen Fahrzeugen, Infrastruktur und weiteren Verkehrsteilnehmern. Es existiert ein Echtzeitdatenfluss, die Verkehrssteuerung ist optimiert und hohe Sicherheitseffekte, Innovationsfreundlichkeit sind realisiert. Damit dieses Szenario stattfinden kann braucht es hohe

Investitionen und eine enge Standardisierung, wobei unklar bleibt, wer die Entwicklungen finanzieren soll.
Im Szenario II – minimale, markeninterne Vernetzung - funktioniert die Kommunikation nur innerhalb einzelner Hersteller-Ökosysteme. Die Infrastruktur spielt eine passive Rolle und Fahrzeuge sind auf Eigenwahrnehmung angewiesen («ego-cars»). In diesem Szenario resultieren geringere Effizienzgewinne bezüglich der Entwicklung, die Innovation verläuft langsamer und es gibt weniger Synergieeffekte.
Die Mindestanforderungen an die Infrastruktur lassen sich in drei Teilbereiche unterteilen. Der Teilbereich Sicherheit benötigt maschinenlesbare Signalisation und Fahrbahnmarkierungen, redundante Systeme (physisch + digital) und Barrierefreiheit für alle Verkehrsteilnehmergruppen. Der Teilbereich Technik verwendet eine flächendeckende V2X-Kommunikationsinfrastruktur (RSU, mobile Netze), bedingt eine Sensorfusion durch Kombination unterschiedlicher Datenträger und verwendet Edge Computing für lokale, möglichst in Echtzeit erfolgende Datenverarbeitung. Der Teilbereich Betrieb funktioniert mit einer Echtzeitdatenaktualisierung, verwendet standardisierte Wartungs- und Prüfprotokolle und erlaubt eine Interoperabilität zwischen Betreibern, Herstellern und Behörden.
Damit die Mindestanforderungen an die Infrastruktur realisiert werden können braucht es eine Digitalisierung der physischen Infrastruktur, eine Integration von Sensorik in Strasseneinrichtungen, die Berücksichtigung von Aspekten der Cybersicherheit z.B. eine Cybersicherheitsarchitektur mit PKI und sicheren Updateprozessen. Sämtliche Innovationsprozesse müssen in der Lage sein ein Mischverkehrsmanagement während der Übergangsphase zu gewährleisten. Für ein künftiges, funktionierendes Verkehrssystem braucht es eine technische Entwicklung, welche Synergien zwischen Fahrzeug- und Infrastrukturtechnik vereint. Der Fokus auf die Fahrzeugsensorik allein reicht nicht aus. Um den kooperativen intelligenten Transport zu ermöglichen, braucht es klare Standards und Interoperabilität als Grundvoraussetzung. Die Infrastruktur fungiert dabei sowohl als „Ermöglicher“ (V2X, Datenbereitstellung) als auch als „Optimierer“ (Verkehrssteuerung). Weiter zeigt die Studie, dass die künftigen Entwicklungen einen gesellschaftlichen Nutzen liefern müssen. Im Fokus stehen, ein Potenzial für bessere Sicherheit, Effizienz und Nachhaltigkeit. Entscheidend für den Erfolg der Einführung von autonomen Fahrzeugen erscheinen die Ansprüche an den Datenschutz und generell Fragen der Technologieakzeptanz der Bevölkerung.
Aus der Studie wird weiterer Forschungsbedarf in folgenden Themenbereichen ersichtlich.

- Interoperabilität & Standardisierung
- Datenschutz & Datenintegrität
- Wirtschaftliche Anreize, neue Geschäftsmodelle
- Resilienz & Cybersecurity
- Übergangsszenarien im Mischverkehr

Summary

The introduction of connected, conditionally and highly automated vehicles in Switzerland is expected in the coming decade. While the legal framework is being developed, it remains unclear whether the existing road infrastructure will be sufficient or whether targeted adjustments will be necessary and minimum infrastructure requirements will have to be set. The study addressed and answered the following key questions in particular:

- Do automated vehicles have to adapt to existing infrastructure or vice versa?
- Which physical and digital infrastructure components are essential?
- What infrastructure requirements arise in different operating environments (ODD – Operational Design Domains)?

The procedure was divided into four steps. As part of the literature review, the international state of research on AV technologies, sensor technology, V2X communication, and EU and Swiss regulations was presented. The ODD was defined to determine the relevant operating conditions for different road categories (urban, extra-urban and high-performance roads). The results take into account the description of a maximally connected scenario in comparison with a minimal variant. The description of the sensor technology and communication devices (V2X) used served as a basis for deriving minimum infrastructure requirements in the areas of safety, technology, operation and development. To this end, expert interviews, workshops and scenario comparisons were conducted.

In terms of autonomy levels (SAE 0-5), the focus was on levels 3 and 4, with increasing system responsibility and decreasing driver intervention. In terms of sensor technology, a combination of camera, LiDAR, radar and ultrasound was considered, supplemented by IMU, GPS/GNSS and vehicle-internal measurement systems. Particularly noteworthy were the limitations in poor weather conditions, the dependence on high signal coverage and the high computing power required, which must be provided by central computers outside the vehicle.

In the field of communication, V2V (vehicle-to-vehicle) for collision avoidance and coordination, V2I (vehicle-to-infrastructure) for traffic light information, hazard warnings and dynamic traffic control, and V2P/V2N for interactions with pedestrians and network services were analysed. It was clear that communication technology will have to adapt to a long-lasting mixed traffic situation and that the communication services offered can also provide significant safety and efficiency gains for non-automated traffic.

The development was considered based on two different scenarios for the future expansion of road infrastructure. Scenario I – maximum connectivity – describes complete V2X communication between all vehicles, infrastructure and other road users. There is a real-time data flow, traffic control is optimized, and high safety effects and innovation-friendliness are achieved. For this scenario to become a reality, high investment and close standardization are required, although it remains unclear who should finance the developments.

In scenario II – minimal, brand-internal connectivity – communication only works within individual manufacturer ecosystems. The infrastructure plays a passive role and vehicles rely on their own perception ('ego cars'). In this scenario, there are lower

efficiency gains in terms of development, innovation is slower and there are fewer synergy effects.

The minimum infrastructure requirements can be divided into three sub-areas. The safety sub-area requires machine-readable signalling and road markings, redundant systems (physical + digital) and accessibility for all road user groups. The technology sub-area uses a comprehensive V2X communication infrastructure (RSU, mobile networks), requires sensor fusion through the combination of different data carriers and uses edge computing for local data processing, preferably in real time. The operations sub-area functions with real-time data updates, uses standardized maintenance and test protocols and allows interoperability between operators, manufacturers and authorities.

In order to meet the minimum infrastructure requirements, the physical infrastructure must be digitized, sensors must be integrated into road infrastructure, and cyber security aspects must be taken into account, e.g. a cyber security architecture with PKI and secure update processes. All innovation processes must be able to ensure mixed traffic management during the transition phase. A future functioning transport system requires technical development that combines synergies between vehicle and infrastructure technology. Focusing on vehicle sensor technology alone is not enough. Clear standards and interoperability are prerequisites for enabling cooperative intelligent transport. The infrastructure acts both as an enabler (V2X, data provision) and as an optimizer (traffic control). The study also shows that future developments must deliver social benefits. The focus is on the potential for improved safety, efficiency and sustainability. Data protection requirements and general questions regarding public acceptance of technology appear to be crucial for the successful introduction of autonomous vehicles.

The study identifies a need for further research in the following areas.

- Interoperability & standardization
- Data protection & data integrity
- Economic incentives, new business models
- Resilience & cybersecurity
- Transition scenarios in mixed traffic

Résumé

L'introduction de véhicules connectés, conditionnellement automatisés et hautement automatisés est attendue en Suisse au cours de la prochaine décennie. Alors que les bases légales sont en cours d'élaboration, la question reste ouverte de savoir si l'infrastructure routière existante est suffisante ou si des adaptations ciblées sont nécessaires et si des exigences minimales doivent être imposées à l'infrastructure. L'étude a notamment abordé les questions fondamentales suivantes :

- Les véhicules automatisés doivent-ils s'adapter à l'infrastructure existante ou l'inverse ?
- Quels sont les composants physiques et numériques indispensables de l'infrastructure ?
- Quelles sont les exigences en matière d'infrastructure dans différents environnements d'exploitation (ODD – Operational Design Domains) ?

La procédure s'est articulée en quatre étapes. Dans le cadre de la recherche documentaire, l'état de la recherche internationale sur les technologies AV, les capteurs, la communication V2X et la réglementation européenne et suisse a été présenté. La définition des ODD a été utilisée pour déterminer les conditions d'exploitation pertinentes pour différentes catégories de routes (en agglomération, hors agglomération et routes à grand débit). Les résultats tiennent compte de la description d'un scénario de connectivité maximale par rapport à une variante minimale. La description des capteurs et des dispositifs de communication (V2X) utilisés a servi de référence et de base pour définir les propositions d'exigences minimales en matière d'infrastructure dans les domaines de la sécurité, de la technique, de l'exploitation et du développement. À cette fin, des entretiens avec des experts, des ateliers et des comparaisons de scénarios ont été organisés.

En ce qui concerne les niveaux d'autonomie (SAE 0-5), l'accent a été mis sur les niveaux 3 et 4, avec une responsabilité croissante du système et une intervention décroissante du conducteur. En matière de capteurs, une combinaison de caméras, de LiDAR, de radars et d'ultrasons, complétée par des IMU, des GPS/GNSS et des systèmes de mesure internes au véhicule, a été envisagée. Les limitations, notamment en cas de mauvaises conditions météorologiques, la dépendance à une couverture élevée du signal et la puissance de calcul élevée requise, qui doit être fournie par des ordinateurs centraux situés à l'extérieur du véhicule, ont particulièrement retenu l'attention.

Dans le domaine de la communication, les technologies analysées comprenaient notamment le V2V (véhicule à véhicule) pour la prévention des collisions et la coordination, le V2I (véhicule à infrastructure) pour les informations sur les feux de signalisation, les avertissements de danger et la gestion dynamique du trafic, ainsi que le V2P/V2N pour les interactions avec les piétons et les services réseau. Il est apparu clairement que la technologie de communication doit s'adapter à une situation de trafic mixte qui va perdurer et que les services de communication proposés peuvent également offrir des gains de sécurité et d'efficacité significatifs pour le trafic non automatisé.

Le développement a été examiné à l'aide de deux scénarios différents pour l'extension future de l'infrastructure routière. Le scénario I – interconnexion maximale – décrit une communication V2X complète entre tous les véhicules, l'infrastructure et les autres

usagers de la route. Il existe un flux de données en temps réel, la gestion du trafic est optimisée et des effets positifs importants en matière de sécurité et d'innovation sont réalisés. Pour que ce scénario puisse se concrétiser, des investissements élevés et une normalisation stricte sont nécessaires, mais la question du financement de ces développements reste ouverte.

Dans le scénario II – interconnexion minimale au sein d'une même marque –, la communication ne fonctionne qu'au sein des écosystèmes de chaque constructeur. L'infrastructure joue un rôle passif et les véhicules dépendent de leur propre perception (« ego-cars »). Ce scénario se traduit par des gains d'efficacité moindres en matière de développement, un ralentissement de l'innovation et une réduction des effets de synergie.

Les exigences minimales en matière d'infrastructure peuvent être divisées en trois sous-domaines. Le sous-domaine de la sécurité nécessite une signalisation lisible par les machines et des marquages routiers, des systèmes redondants (physiques + numériques) et l'accessibilité pour tous les groupes d'usagers de la route. Le domaine technique utilise une infrastructure de communication V2X couvrant l'ensemble du territoire (RSU, réseaux mobiles), nécessite une fusion des capteurs par la combinaison de différents supports de données et utilise l'Edge Computing pour le traitement local des données, si possible en temps réel. Le domaine de l'exploitation fonctionne avec une mise à jour des données en temps réel, utilise des protocoles de maintenance et de contrôle standardisés et permet l'interopérabilité entre les exploitants, les fabricants et les autorités.

Afin de satisfaire aux exigences minimales en matière d'infrastructure, il est nécessaire de numériser l'infrastructure physique, d'intégrer des capteurs dans les équipements routiers et de prendre en compte les aspects liés à la cybersécurité, par exemple une architecture de cybersécurité avec PKI et des processus de mise à jour sécurisés. Tous les processus d'innovation doivent être en mesure de garantir une gestion mixte du trafic pendant la phase de transition. Pour garantir le bon fonctionnement du système de transport à l'avenir, il est nécessaire de développer des technologies qui combinent les synergies entre les technologies des véhicules et des infrastructures. Il ne suffit pas de se concentrer uniquement sur les capteurs des véhicules. Pour permettre le transport intelligent coopératif, des normes claires et l'interopérabilité sont indispensables. L'infrastructure joue ici un rôle à la fois de « facilitateur » (V2X, mise à disposition des données) et d'«optimiseur» (contrôle du trafic). L'étude montre également que les développements futurs doivent apporter un bénéfice social. L'accent est mis sur le potentiel d'amélioration de la sécurité, de l'efficacité et de la durabilité. Les exigences en matière de protection des données et, de manière générale, les questions relatives à l'acceptation de la technologie par la population semblent être déterminantes pour le succès de l'introduction des véhicules autonomes.

L'étude met en évidence la nécessité de poursuivre les recherches dans les domaines suivants.

- Interopérabilité et normalisation
- Protection et intégrité des données
- Incitations économiques, nouveaux modèles commerciaux
- Résilience et cybersécurité
- Scénarios de transition dans le trafic mixte

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Es wird erwartet, dass innerhalb der nächsten Dekade in mehreren Schritten für das bedingt- und hochautomatisierte Fahren (SAE-Levels 3 und 4) entsprechende Fahrzeuge in der Schweiz zur Verfügung stehen. Während sich die dafür erforderlichen rechtlichen Grundlagen derzeit in der Ausarbeitung befinden, ist die Frage ungeklärt, ob diese Fahrzeuge besondere Anforderungen an die physische bzw. digitale Infrastruktur stellen, die über diejenigen hinausgehen, die konventionell gesteuerte Fahrzeuge haben.
Eine der verschiedenen Fragen, die mit dieser Forschung im ASTRA beantwortet werden sollen, ist jene, ob sich automatisierte Fahrzeuge an die bestehende Infra-struktur anpassen sollen oder ob die Strasseninfrastruktur an die Anforderungen der automatisierten Fahrzeuge angepasst werden muss. Eine Übersicht der laufende Forschungsvorhaben, die von der Arbeitsgruppe Mobilität 4.0 initiiert wurden, finden sich in der ARAMIS-Datenbank [1].

- Der Einsatz von «intelligent speed adaptation» (ISA) Systemen geben bereits vor der Einführung von AV Hinweise auf Unzulänglichkeiten der Signalisation.
- Fahrbahnmarkierungen müssen für Level-4 AV auch maschinenlesbar sein (Markierungsüberlagerungen, Erkennung von Missuse mit falschen Markierungen), um keine Sicherheitsrisiken zu generieren.
- Zusätzlich wäre ein V2V Kommunikation wünschenswert, um u.a. folgende Assistenzsysteme zu ermöglichen: Auffahrschutz; Spurhalteassistent / Überwachung des toten Winkels; Auffahrwarnung (mit Bremsleuchten); Kreuzungsassistent; Einsatzfahrzeugmelder; Baustellenwarner, Kolonnenbildung.
- Intelligente Mobilität, künftige Verkehrsleitung/Lenkung verlangt Car to Infrastruktur Kommunikation.

1.2 Erwartete Vorteile der intelligenten Verkehrssysteme

Mittels Intelligenten Verkehrssystemen wird der Anwendungsbereich auf neu entstehende Dienste wie multimodale Informations-, Buchungs- und Fahrkartenverkaufsdienste (z. B. Apps für die Suche und Buchung von Fahrten, die öffentliche Verkehrsmittel, Mitfahrgelegenheiten oder Fahrraddienste kombinieren), die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur und die automatisierte Mobilität ausgedehnt. Im Rahmen der angestrebten stärkeren Digitalisierung von Prozessen enthalten die neuen Vorschriften auch Zielvorgaben für die Digitalisierung wichtiger Informationen, etwa über Geschwindigkeitsbegrenzungen, Baustellen und multimodale Zugangsknotenpunkte, sowie für die Bereitstellung wichtiger Dienste wie Informationen über die Verkehrssicherheit. Zu den Vorteilen für die Verkehrsteilnehmer gehören

Echtzeitinformationen und digitale, intelligente Strasseninfrastrukturen sowie genauere intelligente Geschwindigkeitsassistenzsysteme.
Die überarbeiteten Vorschriften/Regularien zielen auch darauf ab, die Einführung kooperativer IVS zu erleichtern, die es Fahrzeugen und Straßeninfrastruktur er-möglichen, miteinander zu kommunizieren, um beispielsweise vor unerwarteten Ereignissen wie einem Stau zu warnen.

1.3 Ziele des Forschungsprojektes

Um für eine möglicherweise notwendige Anpassung der Infrastruktur in der Schweiz Vorbereitungen treffen zu können, sind die grundsätzlichen Ansprüche von vernetzten, bedingt- und hochautomatisierten Fahrzeugen an die Infrastruktur zu klären. Dabei sollen vorerst die Eigenschaften der ODD für den inner- als auch ausserstädtischen Bereich definiert werden, darauf aufbauend Fahrzeug und Sensorik klassifiziert, und final die jeweiligen Mindestanforderungen an die Infrastruktur abgeleitet werden. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen Grundlagen für entsprechende Entscheidungsprozesse und Kostenabschätzungen der Behörden liefern.
Es geht darum die Markierungen für Sensoren möglichst eindeutig identifizierbar zu machen. Dabei stehen die Markierungen und Signale in Wechselwirkung mit den Sensoren, deren Technik sich laufender Entwicklung befindet. Neben der Erkennung von Signalen sollen auch Möglichkeiten der Kontrolle und/oder Steuerung von Fahrzeugen durch die Infrastruktur beschrieben werden (Geschwindigkeitssteuerung, Abstandsteuerung, Warnung vor Hindernissen etc.) Weiter soll die Frage beantwortet werden, ob sich automatisierte Fahrzeuge an die bestehende Infrastruktur anpassen sollen oder ob die Strasseninfrastruktur an die Anforderungen der automatisierten Fahrzeuge angepasst werden sollte.
Ausserdem soll die Frage beantwortet werden, was die Fahrzeuge können müssen, um in den verschiedenen Infrastrukturen sicher unterwegs sein zu können. Mittels Experteninterviews soll geklärt werden, welche Fahrzeuganforderungen erfüllt werden müssen, um in den 5 Klassen ISAD E-A sicher unterwegs sein zu können.
Um der ungewissen Technologieentwicklung Rechnung zu tragen, sollen in den Workshops jeweils 2 Szenarien bearbeitet werden. Szenario I beinhaltet eine maximale Vernetzung von Fahrzeugen mit der Verkehrsinfrastruktur, während in Szenario II eine minimale Vernetzung der Fahrzeuge innerhalb der gleichen Marke möglich sein wird.
Zusätzlich bildet das Forschungsprojekt eine ideale Plattform für die Fortsetzung des Projektes «Automatisiertes Fahren im Strassentunnel» [2]. Bei diesem Projekt wurde festgestellt, dass man infrastrukturseitig durchaus Optimierungen vornehmen kann, welche die momentan zur Verfügung stehende Sensorik bestmöglich unterstützen und dazu beiträgt die Sicherheit zu erhöhen.

1.4 Abgrenzung

Das vorliegende Forschungsprojekt stützt sich auf die Resultate des ASTRA-Forschungspakets «Auswirkungen des automatisierten Fahrens» [3]. Die darin analysierten Problemstellungen und Erkenntnisse werden als Grundlage verwendet und nicht explizit hinterfragt. 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 durch das bedingt- und hochautomatisierte Fahren (Automatisierungsstufen 3 und 4). Während sich die dafür erforderlichen rechtlichen Grundlagen derzeit in der Ausarbeitung befinden, ist die Frage ungeklärt, ob diese Fahrzeuge besondere Anforderungen an die physische bzw. digitale Infrastruktur stellen, die über diejenigen hinausgehen, die konventionell gesteuerte Fahrzeuge haben. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden wohl stark von den technischen Weiterentwicklungen auf Seiten der Fahrzeugtechnik und der Infrastruktur beeinflusst werden. Sicherlich macht es Sinn den Zeithorizont auf 2030 zu beschränken. In den kommenden Jahren ist mit einer stetigen technischen Weiterentwicklung zu rechnen, wobei wohl die Autohersteller die Geschwindigkeit der Innovation bestimmen werden. Innovationen dürften in Premiumsegmenten lanciert werden und danach mit einer gewissen Verzögerung in die Massenprodukte einfliessen und zum Standard werden. Sinnvoll wäre sicher ein Ko-Evolution von Fahrzeugtechnik und Infrastrukturunterstützung. Die Frage, ob ein Fahrzeug allein alles können muss, oder ob ein Verkehrsmanagement über eine moderne, noch zu bauende Infrastruktur die Fahrzeuge kontrollieren wird, bleibt im Moment offen. Momentan scheinen die Autohersteller ihre Fahrzeuge möglichst autonom zu planen. Um jedoch die Vorteile der intelligenten Mobilität ausschöpfen zu können, ist eine weitere Digitalisierung und Integration der Kommunikation mit Verkehrsinfrastruktur unerlässlich. Um dem Forschungsprojekt die notwendige Stringenz zu verleihen, wird die weitere Entwicklung der intelligenten Mobilität in 2 Szenarien gepackt und zu analysiert:

- Szenario I: Maximale Vernetzung von Fahrzeugen mit der Verkehrsinfrastruktur: In dieser künftigen Welt gelingt es Vorteile der intelligenten Mobilität maximal zu nutzen. Die Verkehrsinfrastruktur liefert in Echtzeit Verkehrsdaten, verarbeitet Daten von Fahrzeugen, und sämtlichen anderen Verkehrsteilnehmern und optimiert den Verkehrsfluss und lenkt die Mobilitätsströme, neue Geschäftsmodelle eröffnen sich, man gibt sich maximal technikoffen und ermöglich innovative Piloten zeitnah unter Berücksichtigung von Sicherheit und Effizienz und Bezahlbarkeit.
- Szenario II: Beschränkte minimale Vernetzung von Fahrzeugen innerhalb der gleichen Marke: Autohersteller haben wenig Interesse die Kommunikation von Fahrzeugen verschiedener Marken zu ermöglichen. Weiter gehen sie davon aus, dass die Fahrzeuge mit allen Verkehrsbedingungen «zurecht» kommen müssen. Staumeldungen, Unfallmeldungen, Strassenzustand etc. wird nur innerhalb der Marke ausgetauscht. Die Fahrzeuge senden keine Daten an die Verkehrsinfra-struktur und lassen externe Beeinflussung nicht zu. Die Entwicklung erfolgt iterativ, technologische Neuigkeiten werden im Premiumsegment ausgerollt und all-mählich in der Modellpalette integriert. Die Chancen der intelligenten Mobilität werden nur teilweise genutzt, die Entwicklung verläuft eher langsam.

1.5 Vorgehen

1.5.1 Vorgehensplan

Die genannten Ziele und Fragestellungen werden in fünf Arbeitsschritten (Meilensteine 1 – 5) strukturiert beantwortet (vgl. **Abbildung 1**).

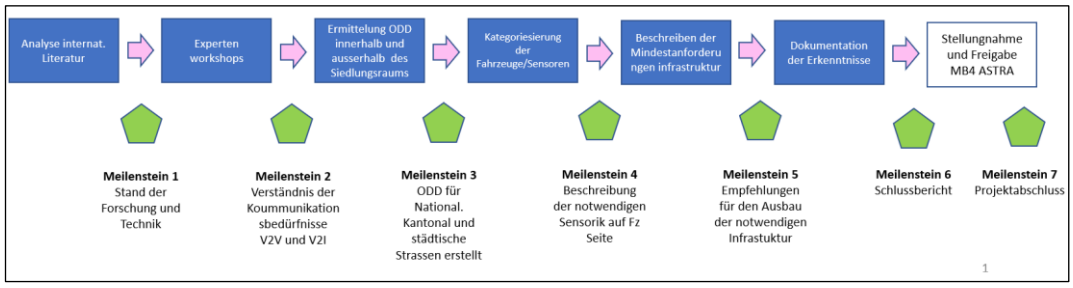

Abbildung 1: Vorgehensplan

1.5.2 Arbeitsschritte

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden folgende Arbeitsschritte geplant und durchgeführt:

- Zu Beginn der Studie wird der aktuelle Stand der Forschung zum automatisierten Fahren, die Kategorisierung der Fahrzeuge und AV-Sensoren insbesondere in Bezug auf Level 3 und Level 4 dargestellt und allfällige Lücken aufgezeigt. In der Literaturreche (Kap. 2) richtet sich der Fokus auf «connected driving» und die Kommunikation der AV mit der Infrastruktur, sowie auch mit anderen AV und mit traditionellen Fahrzeugen, welche sich nicht auf L3 und L4 bewegen. Zusätzlich wird die Kooperative Wahrnehmung basierend auf dem System Infrastruktur / Fahrzeug erhoben, welche sich durch die Anwendung der ISAD-Kategorisierung ergeben. Flankierend wird eine Übersicht der relevanten Dokumente auf EU-Ebene, hinsichtlich dem Umgang mit digitalen Daten im Strassenverkehr erstellt. Mit diesem Arbeitsschritt wurden die Meilensteine 1, 2 und 4 erreicht.
- Die Ermittlung und Kategorisierung möglicher realistischer Betriebsbedingungen (Elemente einer ODD), die für den Einsatz von bedingt- und hochautomatisierten Fahrzeugen auf öffentlichen Strassen innerhalb und ausserhalb des Siedlungsraums zentral sind erfolgt der Abschluss des Meilensteins 3 in Kap. 3.
- Eine Kategorisierung der automatisierten Fahrzeuge anhand ihrer technischen Ausstattung, insbesondere bei der Verwendung verschiedener OEDR-Systeme wird ebenfalls in Kap. 3 vorgenommen (Meilenstein 4).
- In Kap. 4 wird auf die Elemente der verschiedenen Kommunikationstypen eingegangen.
- In Kap. 5 werden die Mindestanforderungen an die physische und digitale Infrastruktur auf der Basis der verschiedenen zuvor festgelegten ODD und OEDR-Systeme sowie der für den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen auf öffentlichen Strassen benötigten Daten, bzw. Informationen beschrieben. Dabei erfolgt eine qualitative Abschätzung der notwendigen Investitionen und eines sinnvollen zeitlichen Ablaufs für drei Modellfälle - Betrieb der automatisierten Fahrzeuge: innerstädtisch, auf Nationalstrassen und auf Kantonsstrassen. Dabei werden spezifische Anforderungen an die Infrastruktur in den drei abgrenzbaren Bereichen «Sicherheit», «Technik» und «Betrieb» ermittelt.

2 Internationaler Stand der Forschung

2.1 Einleitung

Die Entwicklung autonomer Fahrzeuge ist in den letzten zehn Jahren rasant vorangeschritten, hat die Landschaft der Automobilindustrie verändert und den Weg für eine Zukunft geebnet, in der selbstfahrende Autos ein alltäglicher Anblick auf unseren Strassen sind. Autonome Fahrzeuge (AVs), auch bekannt als selbstfahrende Autos, nutzen eine Kombination aus fortschrittlichen Technologien wie künstlicher Intelligenz (AI), maschinellem Lernen, Sensoren und Echtzeit-Datenverarbeitung, um ohne menschliches Zutun zu navigieren. Unternehmen wie Waymo [4], Tesla [5] und General Motors [6] stehen an der Spitze dieser Revolution, investieren massiv in die Entwicklung von AVs und tragen zur wachsenden Marktgrösse in diesem Sektor bei. Der weltweite Markt für autonome Fahrzeuge hat ein beträchtliches Wachstum erfahren und wird Prognosen zufolge bis 2030 einen Wert von über 600 Milliarden US-Dollar erreichen [7]. Dieser Anstieg ist auf die potenziellen Vorteile zurückzuführen, die autonome Fahrzeuge bieten, wie z. B. erhöhte Sicherheit, weniger Verkehrsstaus und verbesserte Kraftstoffeffizienz [8].

Trotz dieser Fortschritte stehen autonome Fahrzeuge noch vor einigen Herausforderungen. Unfälle, an denen autonome Fahrzeuge beteiligt waren, zeigen, dass sie derzeit nur begrenzt in der Lage sind, unerwartete Strassenbedingungen zu bewältigen oder komplexe Verkehrsszenarien zu interpretieren [9], [10]. Darüber hinaus sind Sensortechnologien wie LiDAR, Kameras und Radar zwar fortschrittlich, haben aber bei ungünstigen Wetterbedingungen wie starkem Regen, Nebel oder Schnee ihre Schwierigkeiten [10]. Ausserdem ist die Rechenleistung von AVs durch die Kosten des Geräts und den Platz im Fahrzeug begrenzt und kann die Leistung einiger komplizierter Algorithmen beeinträchtigen, was zu Sicherheitsrisiken führt.

Die Unzulänglichkeiten von AVs können durch die Zusammenarbeit mit der strassenseitigen Infrastruktur und die Nutzung von deren Erfassungs- und Rechenkapazitäten gemildert werden. Die zunehmende Vernetzung von Fahrzeugen, einschliesslich der Vehicle-to-Everything (V2X)-Kommunikation, hat die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen vorangetrieben [11]. Die V2X-Technologie ermöglicht es den Fahrzeugen, untereinander und mit der umgebenden Infrastruktur zu kommunizieren und so Echtzeitdaten über den Verkehrszustand, Strassengefahren und andere wichtige Informationen zu liefern. Der effektive und zuverlässige Betrieb von AVs hängt also nicht nur von den Fahrzeugen selbst ab, sondern auch von der umgebenden Infrastruktur, die ihre Funktionalität unterstützt [11] und eine entscheidende Rolle bei der Bereitstellung von Echtzeitinformationen spielt, die für sicheres und effizientes autonomes Fahren benötigt werden [12]. Ohne diese Infrastrukturen kann das volle Potenzial von autonomen Fahrzeugen nicht ausgeschöpft werden, insbesondere in komplexen oder risikoreichen Umgebungen.

Da die Entwicklung autonomer Fahrzeuge weiter voranschreitet, ist es daher wichtig, diese Mängel durch Investitionen in eine robuste Verkehrsinfrastruktur zu beheben

und diese zu entwickeln. Diese Infrastruktur wird sicherstellen, dass autonome Fahrzeuge unter verschiedenen Strassenbedingungen und Umgebungen sicher und effizient betrieben werden können, was letztendlich zu einer weit verbreiteten Annahme und Integration von AVs in unser tägliches Leben führt. Auch das Bundesamt für Strassen (ASTRA) berichtet über bedeutende Fortschritte bei der Integration von V2X-Kommunikation, autonomem Fahren und Verkehrssensoren im Schweizer Verkehrssystem[13], [14]. Es unterstreicht die Notwendigkeit einer umfassenden Konnektivität zwischen Fahrzeugen, Infrastruktur und Verkehrsteilnehmern, um Effizienz und Sicherheit im Verkehr zu erreichen. Darüber hinaus werden regulatorische Anpassungen zur Erleichterung des Einsatzes von automatisierten Fahrzeugen auf öffentlichen Strassen beschrieben, wobei die entscheidende Rolle von Echtzeitdaten und fortschrittlichen Sensortechnologien für den Betrieb dieser Fahrzeuge hervorgehoben wird.

Im weiteren Verlauf der Literaturübersicht werden zunächst die Funktionalitäten und Grenzen von AVs und die aktuelle Entwicklung von V2X-Technologien vorgestellt. Dann wird auf die Sensoren des Wahrnehmungssystems eingegangen und die Computergeräte, die die Datenverarbeitung für die Sensoren und die Rechenlast des Fahrzeugs unterstützen, werden vorgestellt. Darüber hinaus werden die Fahrzeug-zu-Infrastruktur (V2I)-Kommunikationstechnologien diskutiert und auf die bestehenden Testumgebungen für vernetzte und autonome Fahrzeuge (CAVs) in den EU-Ländern eingegangen. Zum Abschluss wird der Stand der Verkehrsinfrastruktur für CAVs zusammengefasst und einige der wichtigsten Probleme und Herausforderungen erörtert, denen sich die Schweiz bei der Entwicklung von infrastrukturfähigen CAVs stellen muss.

2.2 Grundlagen für Autonomes Fahren

2.2.1 Kategorisierung Autonomer Fahrzeuge und Sensoren

AVs stehen an der Spitze der technologischen Innovation im Verkehrswesen und sind so konzipiert, dass sie mit unterschiedlichen Graden der Fahrerunterstützung und Autonomie arbeiten. Die Entwicklung von AVs wird von der Society of Automotive Engineers (SAE) in sechs Stufen eingeteilt, die von Stufe 0 (keine Automatisierung) bis Stufe 5 (Vollautomatisierung) reichen [15], wie in Abbildung 2 dargestellt.

- *Stufe 0:* Keine Automatisierung; der Fahrer ist für alle Aspekte des Fahrens voll verantwortlich.
- *Stufe 1:* Fahrerassistenz; das Fahrzeug kann die Lenkung oder die Beschleunigung unterstützen, jedoch nicht beides gleichzeitig. Der Fahrer muss weiterhin eingreifen.
- *Stufe 2:* Teilautomatisierung; das Fahrzeug kann sowohl die Lenkung als auch die Beschleunigung/Verzögerung übernehmen, aber der Fahrer muss jederzeit bereit sein, die Kontrolle zu übernehmen.
- *Stufe 3:* Bedingte Automatisierung; das Fahrzeug kann alle Fahraufgaben unter bestimmten Bedingungen ausführen, wobei der Fahrer auf Aufforderung des Systems eingreifen muss.
- *Stufe 4:* Hochautomatisierung; das Fahrzeug kann alle Fahraufgaben in bestimmten Umgebungen (z. B. in städtischen Gebieten oder auf Autobahnen) ohne

menschliches Eingreifen ausführen, ist aber nicht in allen Szenarien völlig autonom.

- *Stufe 5:* Vollautomatisierung; das Fahrzeug ist in der Lage, unter allen Bedingungen autonom zu fahren, ohne dass der Mensch eingreifen muss.

Jede Stufe stellt einen bedeutenden Sprung in der technologischen Komplexität und Leistungsfähigkeit dar, wobei Stufe 5 das ultimative Ziel ist - ein Fahrzeug, das überall und unter allen Bedingungen ohne menschliches Zutun selbst fahren kann.

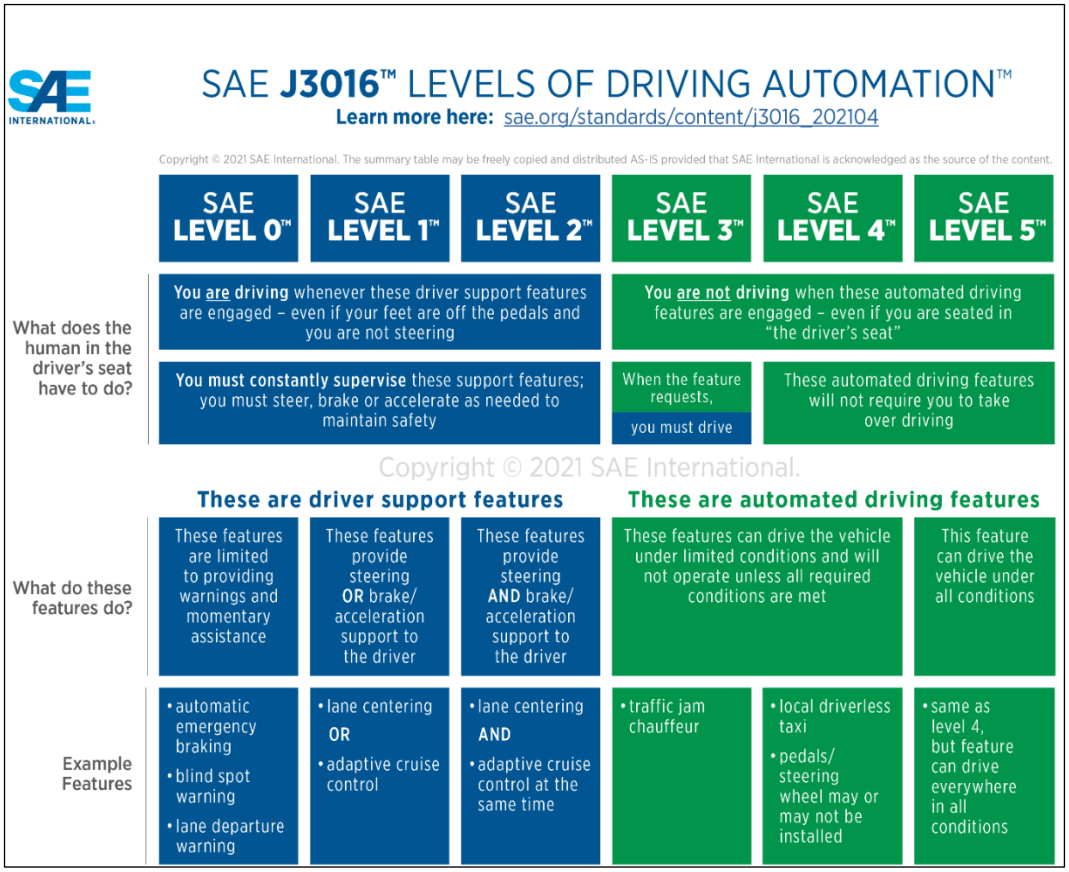

Abbildung 2: SAE-Level der Fahrautomatisierung. [15]

Das Herzstück autonomer Fahrzeuge sind vier entscheidende Module, welche folgende Funktionen erfüllen:

- Wahrnehmung
- Lokalisierung
- Planung
- Steuerung

Diese Module arbeiten zusammen, damit das Fahrzeug sicher und effektiv navigieren kann. Die allgemeine Architektur eines typischen autonomen Fahrzeugs ist in Abbildung 4 dargestellt.

Das Wahrnehmungsmodul ist eine Art Sinnesorgan des Fahrzeugs und nutzt Daten von Sensoren wie Kameras, LiDAR, Radar und Ultraschallsensoren, um ein detailliertes Bild der Umgebung zu erstellen [16]. Dieses Modul identifiziert Objekte wie Fahrzeuge, Fussgänger und Strassenschilder. Seine Effektivität kann jedoch bei ungünstigen Wetterbedingungen wie Regen, Nebel oder Schnee beeinträchtigt werden, was die

Genauigkeit der Sensoren beeinträchtigen kann. Ausserdem kann das System in komplexen städtischen Umgebungen, in denen es zahlreiche sich bewegende Objekte gleichzeitig verfolgen muss, Probleme haben.
Beispielhaft zeigt die Abbildung 3 die Verortung von gängigen Sensoren, die Tabelle 1 listet die verschiedenen Sensortypen auf.

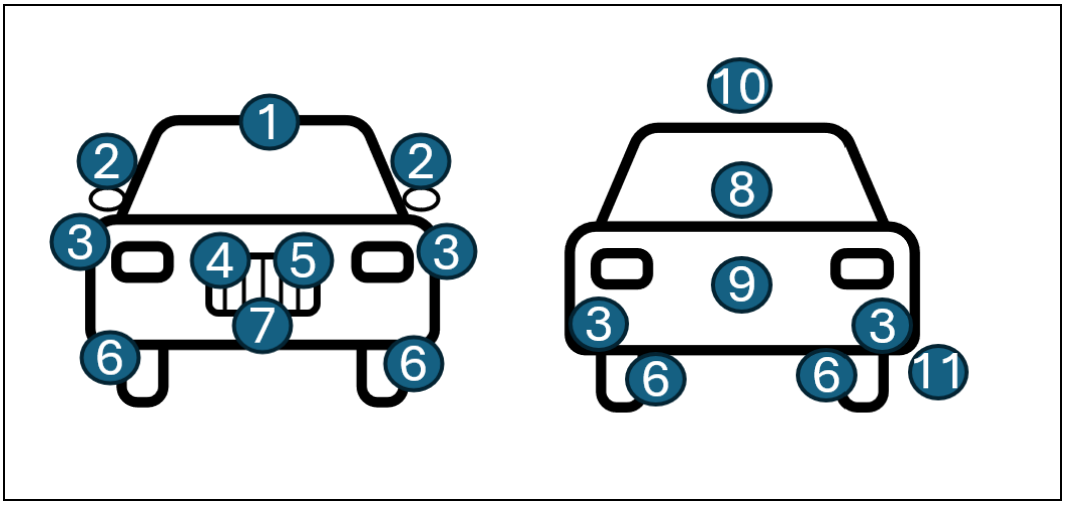

Abbildung 3: Verortung von gängigen Sensoren an der Fahrzeug Front und auf der Rückseite

Verortung gängiger Sensoren auf Fahrzeugen

Nummer	Sensortyp
1	Multifunktionskamera vorn
2	Kameras in Aussenspiegeln
3	Eckradar
4	Frontkamera
5	Frontradar
6	Ultraschallsensoren
7	LiDAR-Sensor
8	Multifunktionskamera hinten
9	Rückfahrkamera
10	Antennenmodul
11	Nässesensor

Tabelle 1: Gängige Sensortypen

Um künftig eine sinnvolle und nutzbare V2V Kommunikation zu ermöglichen, sind Noch weitere Sensoren sind notwendig, dazu gehören u.a. Lenkwinkelsensoren, Drehzahlfühler, IMU (Inertial Measurement Unit) Querbeschleunigungssensoren, welche nicht in der Tabelle aufgeführt sind.
Bei der Lokalisierung wird die genaue Position des Fahrzeugs in seiner Umgebung mit Hilfe von GPS-Daten, Trägheitsmessgeräten (IMUs) und hochauflösenden Karten bestimmt [17]. Eine genaue Lokalisierung ist entscheidend für die Beibehaltung der Position des Fahrzeugs auf der Strasse. Die Abhängigkeit von GPS kann jedoch in

Gebieten mit schlechtem Signalempfang, wie z. B. in Tunneln oder dichten städtischen Umgebungen, zu Fehlern führen. Ausserdem stellt die Abhängigkeit von ständig aktualisierten HD-Karten eine Herausforderung für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Lokalisierungsdaten dar.
Das Planungsmodul ist für die Bestimmung des Fahrzeugpfads oder der Trajektorie verantwortlich, wobei sowohl kurzfristige als auch langfristige Ziele berücksichtigt werden [18]. Dazu gehören Entscheidungen über unmittelbare Manöver wie Fahrspurwechsel sowie die Planung einer sicheren und effizienten Route zum Ziel. Das Planungssystem kann jedoch in dynamischen Umgebungen auf Schwierigkeiten stossen, z. B. wenn unerwartete Ereignisse eintreten, die Anpassungen in Echtzeit erfordern, was eine erhebliche Rechenleistung erfordert.
Das Steuermodul führt die vom Planungsmodul festgelegte Trajektorie aus, indem es die Beschleunigung, das Bremsen und die Lenkung des Fahrzeugs steuert [19]. Das Steuerungssystem muss sicherstellen, dass das Fahrzeug dem geplanten Weg folgt und gleichzeitig Sicherheit und Komfort gewährleistet sind. Seine Leistung hängt von der Präzision der Fahrzeugaktuatoren und der Genauigkeit der vorhergehenden Module ab. Jede Verzögerung oder Ungenauigkeit kann die Fähigkeit des Steuerungssystems beeinträchtigen, schnell auf Veränderungen in der Umgebung zu reagieren.

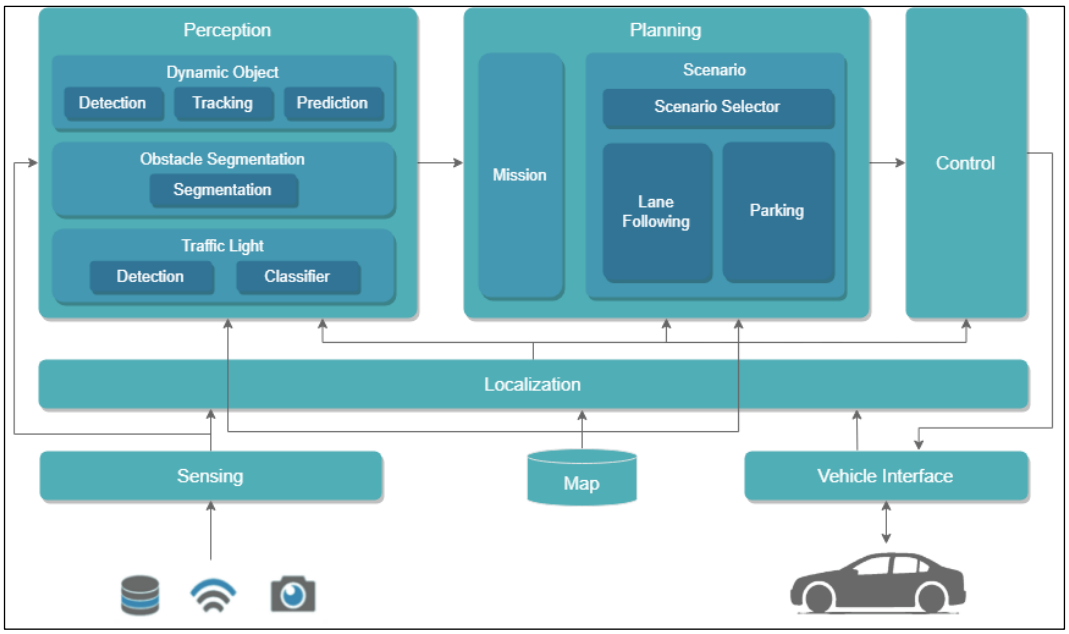

Abbildung 4: Basis-Architektur eines typischen autonomen Fahrzeugs. [20]

Die Schweiz ist ein Vorreiter bei der Erprobung und dem Einsatz autonomer Fahrzeuge, insbesondere im städtischen Umfeld und im öffentlichen Verkehr. Das Bundesamt für Strassen (ASTRA) hat der intelligenten Mobilität Priorität eingeräumt und bietet regulatorische Unterstützung für AV-Tests [21]. Die vielfältigen Gelände- und Wetterbedingungen des Landes bieten ein robustes Testfeld, insbesondere für die Verfeinerung von Wahrnehmungs- und Lokalisierungssystemen. Pilotprojekte mit selbstfahrenden Shuttles und Bussen haben das Potenzial für autonome Fahrzeuge im öffentlichen Verkehr aufgezeigt, auch wenn die Sicherstellung einer konsistenten Leistung bei unterschiedlichen Strassenverhältnissen eine Herausforderung bleibt.

Auch in anderen Ländern werden weltweit grosse Fortschritte bei der Entwicklung autonomer Fahrzeuge gemacht. In den Vereinigten Staaten sind Unternehmen wie Waymo [4] und Tesla [5] führend, wobei die unterschiedlichen rechtlichen Rahmenbedingungen in den einzelnen Bundesstaaten das Tempo der Einführung von AV beeinflussen. Deutschland hat sich als wichtiger Akteur in Europa etabliert, mit seinen Giganten der Automobilindustrie und Initiativen wie dem digitalen Autobahnprüfstand, der die Entwicklung und Erprobung von AV auf öffentlichen Strassen erleichtert [22]. China macht in diesem Bereich rasche Fortschritte, angetrieben durch die starke Unterstützung der Regierung und eine klare Vision für die Integration von AVs in das breitere Verkehrsökosystem [23].
Während autonome Fahrzeuge erhebliche Fortschritte gemacht haben, stellen die verschiedenen Autonomiestufen einzigartige Herausforderungen dar, die es zu bewältigen gilt. Der erfolgreiche Einsatz von AVs hängt von der nahtlosen Integration von Wahrnehmungs-, Lokalisierungs-, Planungs- und Steuerungsmodulen ab, die durch eine robuste Verkehrsinfrastruktur unterstützt werden. Die aktuellen Erfahrungen in der Schweiz, Deutschland, China und den Vereinigten Staaten zeigen, wie wichtig kontinuierliche Innovation und Zusammenarbeit sind, um diese Herausforderungen zu bewältigen und das volle Potenzial der autonomen Mobilität auszuschöpfen.

2.2.2 Strasseninfrastruktur in Europa

Die Strasseninfrastruktur bildet die Grundlage eines jeden Verkehrssystems und umfasst eine Vielzahl physischer und digitaler Elemente, die den sicheren und effizienten Verkehr von Fahrzeugen gewährleisten. Zur herkömmlichen Strasseninfrastruktur gehören Autobahnen, Ausfallstrassen, Stadtstrassen, Brücken, Tunnel, Verkehrsschilder, Strassenmarkierungen und Beleuchtungssysteme. Diese physischen Anlagen sind so konzipiert, dass sie den Verkehrsfluss von Fahrzeugen und Fussgängern unterstützen und gleichzeitig Verkehrsstaus minimieren und die Sicherheit erhöhen. In den letzten Jahren hat sich der Umfang der Strasseninfrastruktur um digitale Komponenten wie Intelligente Verkehrssysteme (IVS) erweitert, die Technologien wie Verkehrsmanagementzentralen, Wechselverkehrszeichen (VMS) und strassenseitige Sensoren umfassen, die mit den Fahrzeugen kommunizieren, um Echtzeitdaten über den Verkehrszustand, Strassengefahren und das Wetter zu liefern.
In Europa ist das Strasseninfrastrukturnetz umfangreich und vielfältig, wobei die verschiedenen Strassentypen unterschiedlichen Zwecken dienen. So sind beispielsweise Autobahnen für Hochgeschwindigkeitsverkehr ausgelegt und in der Regel von anderen Verkehrsarten getrennt, während städtische Strassen komplexer sind und eine Mischung aus Fahrzeugen, Radfahrern und Fussgängern aufnehmen. Einem Bericht der Konferenz der europäischen Strassendirektoren (CEDR) zufolge umfasst das transeuropäische Verkehrsnetz (TEN-V) rund 84 700 Kilometer, wobei sich ein grosser Teil dieser Strassen in ländlichen Gebieten befindet, in denen der Verkehr weniger dicht ist, die aber für die Anbindung wichtig sind. Die Gesamtlänge der verschiedenen Strassentypen in den EU-Ländern ist in Abbildung 5 dargestellt.
Darüber hinaus arbeiten das Europäische Komitee für Normung (CEN) und andere Organisationen an der Standardisierung der Strasseninfrastruktur, um den Einsatz von AVs zu unterstützen. Dazu gehört, dass Strassenmarkierungen, Schilder und andere Elemente sowohl für menschliche Fahrer als auch für automatisierte Systeme sichtbar und interpretierbar sind. Darüber hinaus wird die Integration digitaler Infrastrukturen wie hochauflösende Karten und Echtzeit-Datenaustauschsysteme immer

wichtiger, um die Funktionalität und Sicherheit automatisierter Fahrzeuge zu verbessern.

COUNTRY	ROAD TYPE (KM)		
	Motorways	Highways, Main, National Roads	Secondary, Regional and Rural Roads
AUSTRIA	1719	9997	112399
BELGIUM	1763	13229	140218
CYPRUS	257	2203	7305
CZECH REP.	776	6250	123655
DENMARK	1216	2646	140536
ESTONIA	140	3873	54774
FINLAND	810	12521	64762
GERMANY	12917	39389	178071
GREECE	1558	9299	106464
HUNGARY	1767	6824	194718
ICELAND	11	4919	7960
IRELAND	897	4531	90589
ITALY	6751	19920	229368
LATVIA	-	1674	68769
LITHUANIA	309	6372	65910
LUXEMBOURG	152	837	3782
MALTA	-	2361	4722
NETHERLANDS	2678	2564	133399
NORWAY	392	10562	83423
POLAND	1482	17804	395836
PORTUGAL	3065	6454	4791
SLOVENIA	770	819	37285
SPAIN	14981	15041	636393
SWEDEN	2057	13553	201366
SWITZERLAND	1419	393	69715
UK	3760	49074	368293

Abbildung 5: Strassennetzwerk einiger EU-Länder [24].

2.2.3 Fahrzeug Netzwerk

Unter der gesamten Strasseninfrastruktur sind die mit dem Fahrzeugnetz verbundenen Geräte eine der wichtigsten Kategorien zur Unterstützung von AVs. Insbesondere neue Verbindungstechnologien sind entscheidend, um einige der inhärenten Einschränkungen dieser Fahrzeuge zu überwinden. Diese Technologien, insbesondere diejenigen, die die Vernetzung von Fahrzeugen erleichtern, sind für die Verbesserung der Sicherheit, Effizienz und Zuverlässigkeit von AV-Systemen von wesentlicher Bedeutung, da sie eine nahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeugen, Infrastruktur und anderen Verkehrsteilnehmern ermöglichen.

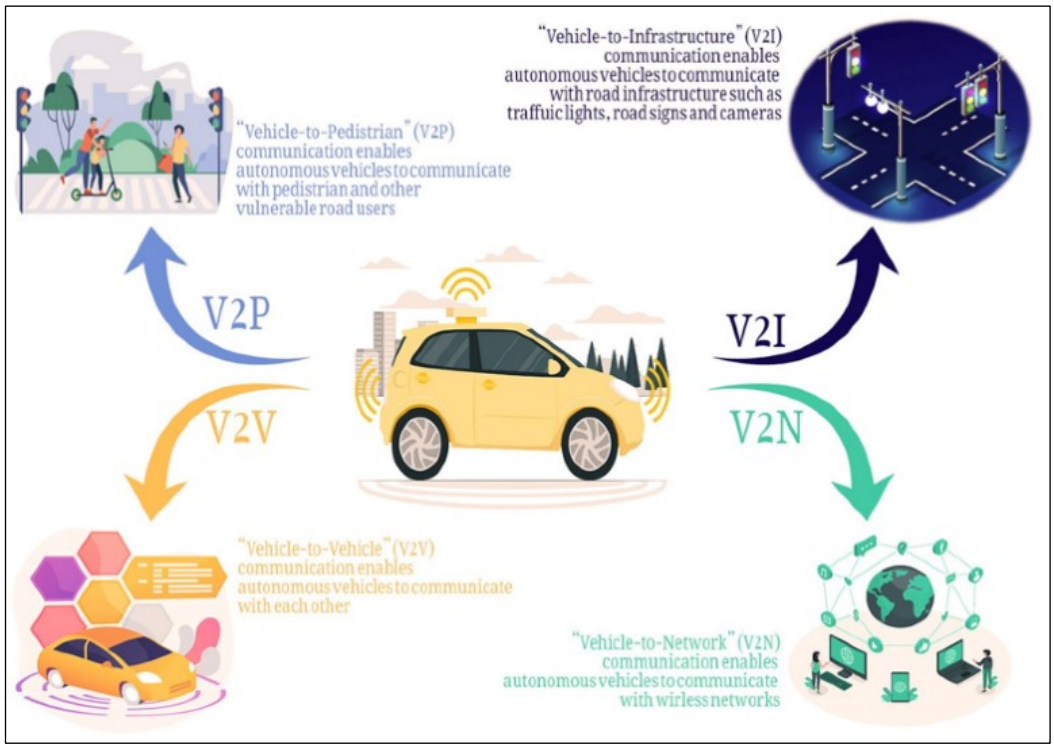

Abbildung 6: Kommunikationsszenarien für autonome Fahrzeuge [25]

Eine der transformativsten Technologien ist die Vehicle-to-Everything (V2X)-Kommunikation [25], die die Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Infrastructure (V2I), Vehicle-to-Network (V2N) und Vehicle-to-Pedestrian (V2P) Kommunikation umfasst, wie in Abbildung 6 dargestellt. V2X ermöglicht es Fahrzeugen, Informationen in Echtzeit auszutauschen, was ihre Fähigkeit, in komplexen Umgebungen zu navigieren und auf dynamische Strassenbedingungen zu reagieren, erheblich verbessert. Die V2V-Kommunikation ermöglicht es AVs beispielsweise, Informationen über ihre Geschwindigkeit, ihren Standort und ihre Flugbahn auszutauschen, was dazu beiträgt, Kollisionen zu vermeiden, indem sie frühzeitig vor potenziellen Gefahren warnt. Die V2I-Kommunikation ermöglicht es AVs, Daten von Verkehrssignalen, Strassenschildern und anderer Infrastruktur zu empfangen, um die Routenplanung zu optimieren und den Verkehrsfluss zu verbessern.

Mit diesen Technologien lassen sich mehrere Einschränkungen autonomer Fahrzeuge beheben, insbesondere in den Bereichen Wahrnehmung und Entscheidungsfindung. Onboard-Sensoren wie LiDAR, Radar und Kameras sind ein wesentlicher Bestandteil der Fähigkeit eines autonomen Fahrzeugs, seine Umgebung wahrzunehmen, aber sie können durch Faktoren wie schlechte Wetterbedingungen, Sensorreichweite und Hindernisse eingeschränkt werden. Die V2X-Kommunikation ergänzt diese Sensoren, indem sie zusätzliche Daten von externen Quellen wie anderen Fahrzeugen oder strassenseitigen Einheiten (RSUs) bereitstellt, so dass das AV selbst in schwierigen Umgebungen fundiertere Entscheidungen treffen kann.

Durch die Integration der 5G-Technologie in Fahrzeugnetze werden die Fähigkeiten autonomer Fahrzeuge weiter verbessert. 5G bietet niedrige Latenzzeiten, hohe Datenübertragungsgeschwindigkeiten und zuverlässige Konnektivität, die für die

Echtzeitkommunikation in Fahrzeugnetzen entscheidend sind. Dies ist besonders wichtig für sicherheitskritische Anwendungen, bei denen Verzögerungen von nur einem Bruchteil einer Sekunde den Unterschied zwischen einem sicheren Manöver und einer Kollision ausmachen können. Mit 5G können AVs untereinander und mit der Infrastruktur fast augenblicklich kommunizieren, was eine präzisere Koordinierung und schnellere Reaktionen auf sich ändernde Strassenbedingungen ermöglicht, wie in Abbildung 7 dargestellt. Informationen in Vorwärtsrichtung, die von der Onboard-Unit eines autonomen Fahrzeugs, das einem anderen Fahrzeug folgt, (noch) nicht erkannt werden können, werden per V2I an das rückwärtige Fahrzeug übertragen.

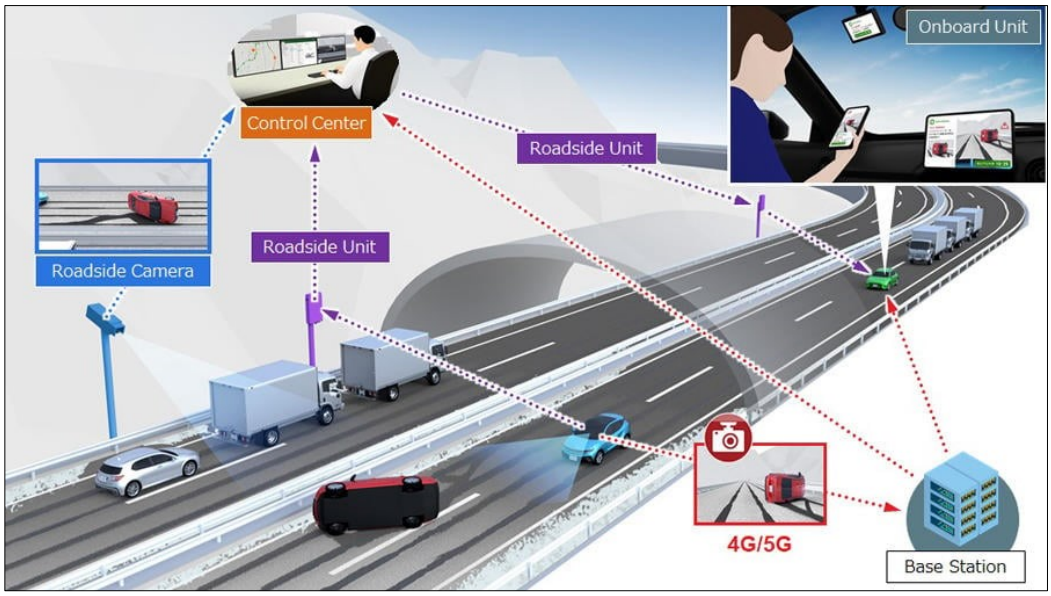

Abbildung 7: V2I – Kommunikation mittels 5G [26]

In der Europäischen Union wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um Technologien zur Vernetzung von Fahrzeugen zu entwickeln und zu standardisieren. Initiativen wie die Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) [27] zielen darauf ab, einen Rahmen für die V2X-Kommunikation in ganz Europa zu schaffen, um den Einsatz von vernetzten und autonomen Fahrzeugen zu erleichtern. Die EU investiert auch in die Entwicklung von 5G-Netzen, die eine zentrale Rolle bei der breiten Einführung autonomer Fahrzeuge spielen sollen.

In anderen Teilen der Welt sind ähnliche Fortschritte zu verzeichnen. In den Vereinigten Staaten testen und implementieren Unternehmen wie Waymo und Tesla V2X-Technologien [28], während die Bundesregierung die Entwicklung der Infrastruktur für vernetzte Fahrzeuge durch Initiativen wie das *Connected Vehicle Pilot Program* [29] unterstützt. Auch China macht in diesem Bereich rasche Fortschritte, mit starker staatlicher Unterstützung und gross angelegten Pilotprojekten zur Integration von V2X-Kommunikation in sein Verkehrsnetz. Chinas aggressiver Vorstoss in Richtung 5G-Einführung dürfte die Einführung autonomer Fahrzeuge in dem Land weiter beschleunigen [30].

Diese aufkommenden Verbindungstechnologien sind für die Ausschöpfung des vollen Potenzials autonomer Fahrzeuge unerlässlich. V2X- und 5G-Technologien überwinden die Grenzen der bordeigenen Systeme und ermöglichen die Kommunikation mit der

Umwelt in Echtzeit und legen damit den Grundstein für sicherere, effizientere und zuverlässigere autonome Verkehrssysteme weltweit. Mit der weiteren Entwicklung dieser Technologien werden sie eine immer wichtigere Rolle bei der weltweiten Entwicklung und Einführung autonomer Fahrzeuge spielen.

2.2.4 Europäische Gesetzgebung

Die europäische Gesetzgebung zur Vorbereitung der Infrastruktur auf das automatisierte Fahren entwickelt sich weiter, um die sichere und effiziente Integration autonomer Fahrzeuge in bestehende Strassensysteme zu unterstützen. Im Folgenden werden einige wichtige Bereiche und relevante Rechtsvorschriften vorgestellt:

Richtlinie 2008/96/EG über das Sicherheitsmanagement für die Strassenverkehrsinfrastruktur [31]: Diese Richtlinie schreibt vor, dass die Strasseninfrastruktur Sicherheitsaudits und Folgenabschätzungen unterzogen wird, die nun auch Überlegungen zu neuen Technologien wie autonomen Fahrzeugen enthalten. Diese Verfahren stellen sicher, dass bei Infrastrukturverbesserungen die Anforderungen fortschrittlicher Fahrzeugsysteme berücksichtigt werden, einschliesslich ihrer Interaktion mit Strassenelementen wie Beschilderung und Fahrbahnmarkierungen. Die Richtlinie verpflichtet die Mitgliedstaaten, Systeme für das Sicherheitsmanagement im Strassenverkehr einzuführen, die auch Aktualisierungen der Infrastruktur zur Anpassung an neue Technologien umfassen. Das bedeutet, dass bei der Infrastrukturplanung die Bedürfnisse autonomer Fahrzeuge, wie z. B. die Bereitstellung klarer Fahrbahnmarkierungen, Beschilderung und Strassengeometrie, berücksichtigt werden müssen

EU IVS-Richtlinie (2010/40/EU) [32]: Die Richtlinie fördert die Einführung von IVS-Anwendungen, einschliesslich solcher, die das autonome Fahren unterstützen. Dazu gehört die Schaffung einer Infrastruktur, die mit Systemen wie Verkehrsmanagementsystemen (TMS) und fortgeschrittenen Reiseinformationssystemen (ATIS) integriert werden kann, welche die autonomen Fahrzeuge mit Echtzeitdaten versorgen. Sie fördert die Entwicklung gemeinsamer Normen für IVS, um sicherzustellen, dass die Infrastruktur in den EU-Mitgliedstaaten effektiv mit autonomen Fahrzeugen kommunizieren kann. Dazu gehören Normen für den Datenaustausch und Kommunikationsprotokolle, die für die Interaktion zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (V2I) erforderlich sind.

Europäische Einführungsleitlinien für kooperative intelligente Verkehrssysteme (C-ITS) [33]: Diese Leitlinien konzentrieren sich auf die Einführung von kooperativen intelligenten Verkehrssystemen (C-ITS), die Vehicle-to-Everything (V2X)-Kommunikationstechnologien umfassen. Diese Systeme erfordern Aktualisierungen der Infrastruktur wie strassenseitige Geräte und Kommunikationsnetze, die den Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und Strasseninfrastruktur erleichtern. Empfohlen wird die Installation von strassenseitigen Geräten wie Sensoren und Sendern, die die V2X-Kommunikation unterstützen. Diese Infrastruktur ist entscheidend dafür, dass autonome Fahrzeuge Informationen über den Strassenzustand, Verkehrssignale und andere wichtige Daten in Echtzeit empfangen können.

Verordnung (EU) 2019/2144 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen [34]: Diese Verordnung enthält Bestimmungen für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme (ADAS) und automatisierte Fahrsysteme (ADS), die mit der Infrastruktur interagieren. Die Verordnung stellt sicher, dass Fahrzeuge mit Technologien ausgestattet sind, die Infrastrukturinformationen wie Verkehrssignale und Strassenschilder nutzen können. Während sich die Verordnung in erster Linie auf Fahrzeugstandards konzentriert,

wirkt sie sich indirekt auf die Infrastruktur aus, indem sie Anforderungen für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur festlegt.
EU-Strategie für Strassenverkehrssicherheit 2021-2030 [35]: Die Strategie unterstreicht die Notwendigkeit einer intelligenten Infrastruktur, die mit automatisierten Fahrtechnologien integriert werden kann. Dazu gehört die Entwicklung einer Infrastruktur, die die Konnektivität von Fahrzeugen und den Datenaustausch in Echtzeit unterstützt, um Sicherheit und Effizienz zu verbessern. Sie ermutigt die Mitgliedsstaaten, die bestehende Strasseninfrastruktur aufzurüsten, um die neuesten technologischen Fortschritte zu unterstützen, einschliesslich derer, die für autonome Fahrzeuge erforderlich sind, wie z. B. verbesserte Strassenmarkierungen, Beschilderung und Verkehrsmanagementsysteme.
Diese rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen sollen gemeinsam sicherstellen, dass die Infrastruktur angemessen vorbereitet ist, um die Einführung automatisierter Fahrtechnologien zu unterstützen, die Verkehrssicherheit zu erhöhen und den effizienten Betrieb autonomer Fahrzeuge zu erleichtern.

2.2.5 Eidgenössische Aktivitäten

Der Vollständigkeit halber soll beispielhaft auf verschiedene Aktivitäten des Bundes aufmerksam gemacht werden.

Verordnung über das automatisierte Fahren (VAF) [36]

Am 13. Dezember 2024 wurde die VAF in Kraft gesetzt. Diese Verordnung regelt die Voraussetzungen für die Zulassung und die Verwendung von Motorfahrzeugen mit einem Automatisierungssystem sowie die Bearbeitung von Daten, die mit solchen Fahrzeugen zusammenhängen. Die Verordnung erlaubt die Benutzung eines Autobahnpiloten, in Fahrzeugen mit einem entsprechenden Automatisierungssystem darf der Fahrzeugführer-in das Steuerrad loslassen, muss aber nach einer Übernahmeaufforderung in der Lage sein das Steuer sofort wieder zu übernehmen. Die künftigen Fahrsysteme kommen dabei ohne zusätzliche Infrastrukturunterstützung aus. Weiter erlaubt die Verordnung das automatisierte Parkieren in ausgewählten Parkhäusern. Das automatisierte Parkieren kann völlig autonome und oder in Kombination mit elektronischen Hilfsmitteln seitens des Parkhauses erfolgen. Weiter wird noch die Anwendung von führerlosen Fahrzeugen auf speziell freigegeben Strecken erlaubt. Diese Fahrzeuge sind zwar führerlos, werden aber von einen Teleoperator überwacht, welcher bei einer Überforderung des autonomen Shuttles eingreifen kann. Ziel dieser Verordnung ist den Verkehr sicherer, effizienter und eventuell auch angenehmer zu gestalten. Momentan kommt diese Entwicklungsstufe jedoch ohne zusätzliche Unterstützung durch eine neue Infrastruktur aus. Zusätzlich werden auch Vorgaben über die Erhebung und Verwendung vor Fahrdaten gemacht und Auflagen für die Cybersicherheit und Softwareupdates erhoben. Parkflächen wie auch Strassen, auf denen autonomes Fahren erlaubt wird, sind genehmigungspflichtig und bedingen ein vorgängiges Einreichen von entsprechenden Gesuchen. Parkhäuser, welche sich für Parkieren mit Automatisierungssystem eigenen werden mit einem neuen Schild markiert (Abbildung 8).

Abbildung 8: Signal "Fahrzeuge mit einem Automatisierungssystem"

MODI Mobilitätsdateninfrastruktur

Anwendungsfälle für die nationale Mobilitätsdateninfrastruktur: Mit der Mobilitätsdateninfrastruktur des Bundes (MODI) sollen Infrastruktur und Angebote effizienter geplant, betrieben und genutzt werden (vgl. Abbildung 9). Der Bund hat zusammen mit den interessierten Akteuren der Personenmobilität, der Logistik, der öffentlichen Hand, der Wirtschaft und der Wissenschaft sieben Anwendungsfälle aus verschiedenen Mobilitätsbereichen festgelegt. Diese stehen in der Startphase der MODI im Fokus mit dem Ziel, Informationen unter Einhaltung des Datenschutzes zu verknüpfen und besser nutzbar zu machen.

- Blaulicht
- Parkplätze Infosystem
- Verfügbarkeit Ladestationen für E-Lastwagen
- Kombination von verschiedenen Mobilitätsangeboten
- Bessere Auslastung von Güterwagen
- Bau, Betrieb und Unterhalt von Strasse und Schiene
- Datenaustausch ermöglicht Integration von automatisierten Fahrzeugen

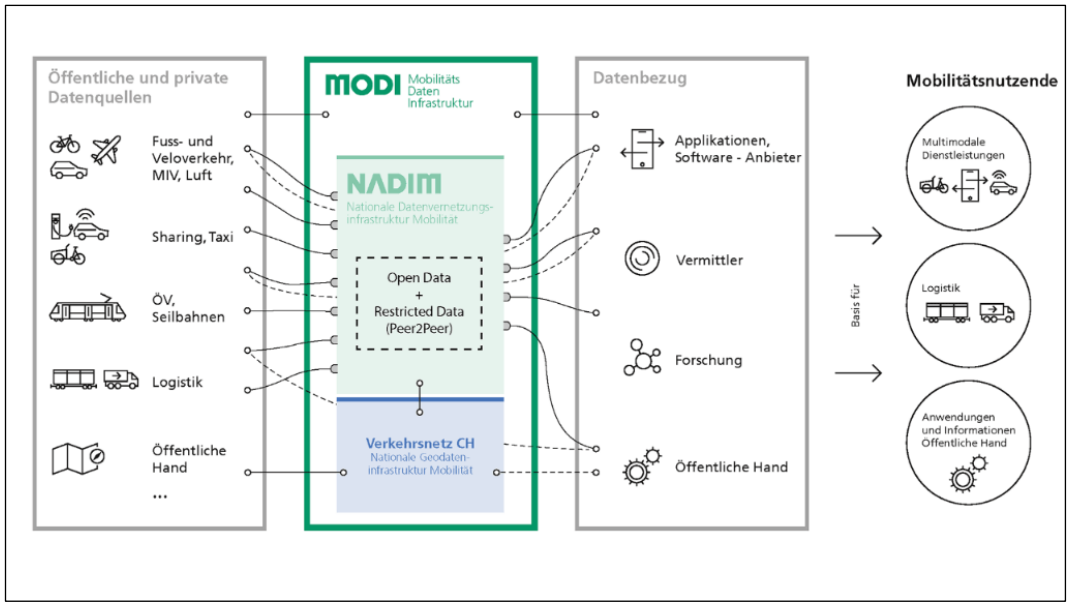

Abbildung 9: Die Mobilitätsdateninfrastruktur (MODI) im Mobilitätssystem (© BAV [37])

Stauendwarnung

In dem Pilotprojekt *Alerte embouteillage* [38] im Raum Basel (2021–2023) wird die Vernetzung von Fahrzeugen mit der Infrastruktur (V2I) herangezogen, um eine verbesserte Stauendwarnung zu unterstützen. Das Projekt wurde vom ASTRA durchgeführt:

- *Zeitraum:* Start Dezember 2021, reale Fahrtests August–November 2023 auf den Autobahnstrecken A2 und A18 rund um Basel.
- *Setup:* Über 4 000 Fahrten von Freiwilligen, deren Fahrzeugdaten *Floating Car Data (FCD)* anonym übermittelt wurden. Diese Daten wurden gegen klassische Erkennungsverfahren (z. B. Kameras, Zählsensoren) validiert.
- *Ergebnisse:*
  - Die FCD-Abdeckung lag bei 3–5 %; zu gering für verlässliche Stauwarnungen.
  - Latenzzeiten zwischen Fahrzeugerhebung und Datenverfügbarkeit betrugen 15 Minuten bis 2 Stunden; deutlich länger als die für Echtzeitwarnung notwendige Grenze von < 60 Sekunden.
- *Fazit:*
  - Aktuell ist die Kombination aus zu geringer Datenabdeckung und hoher Latenzzeit nicht ausgereift genug.
  - Dennoch wurden wichtige Erkenntnisse auch bezüglich neuer Anforderungen und Herausforderungen gewonnen: Vernetzung mit Anbietern, technische Anforderungen, erhöhte Datenkompetenz beim Infrastrukturbetreiber.

Maps

Das Verkehrsnetz CH [39] ist schematisch in Abbildung 10

- optimiert und erweitert die Verkehrsdateninfrastruktur der öffentlichen Hand
- schafft eine gemeinsame Referenz für Verkehrsinfrastruktur- und Mobilitätsdaten
- macht die Daten zur Verkehrsinfrastruktur und zur Mobilität kombinierbar und allgemein nutzbar
- liefert verlässliche Grundlagedaten und macht diese für alle frei zugänglich
- fördert einen effizienten Datenaustausch und sichert eine transparente Datenherkunft
- sorgt mit klaren Prozessen für eine einheitliche und effiziente Datenpflege
- bildet die Grundlage für Innovationen
- ist interessensneutral
- sorgt für eine hohe Qualität der Daten und stellt diese nachhaltig zur Verfügung.

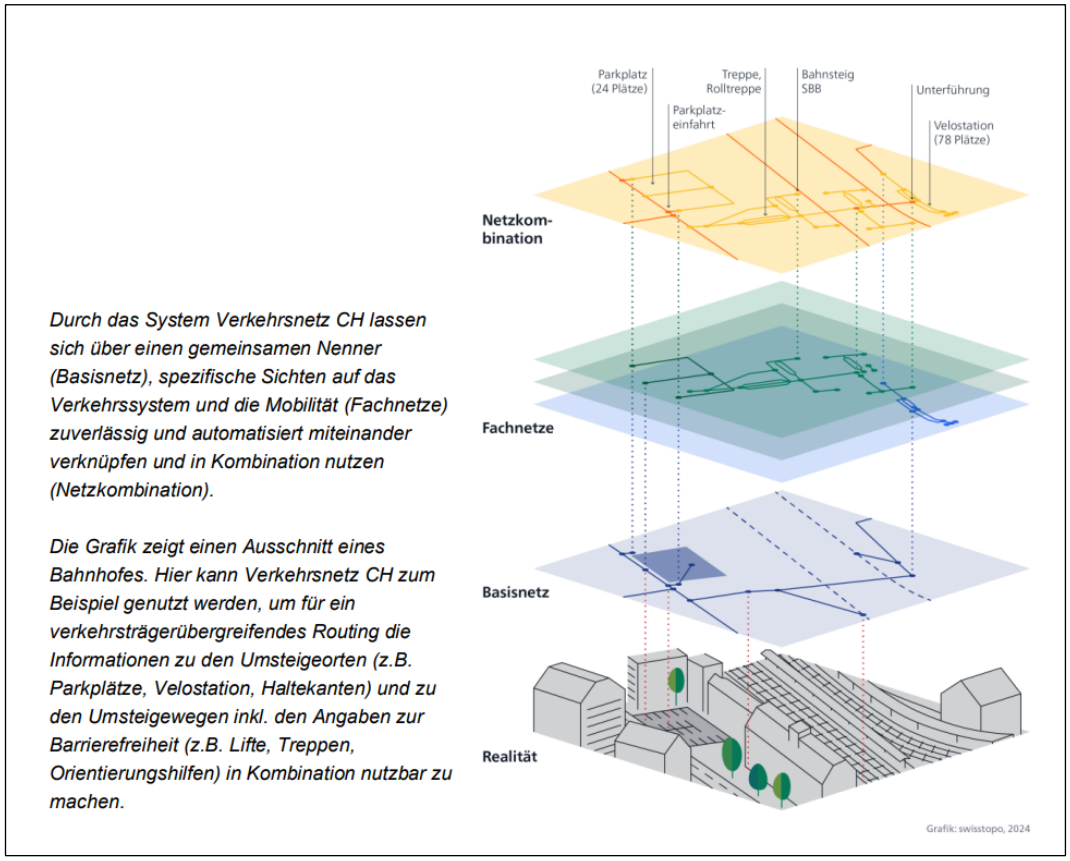

Abbildung 10: Das Verkehrsnetz CH [39]

Anwendungsfälle

- Fussgängerrouting
- Blaulichtrouting
- Ausnahmetransportrouting
- Multimodales Routing

2.3 Limitationen für individuelle autonome Fahrzeuge

Das autonome Fahren hat zwar viele potenzielle Vorteile, wie z. B. die Verbesserung der Sicherheit, des Komforts und der Mobilität, stösst aber auch auf viele Herausforderungen und Einschränkungen, die seine Entwicklung und Einführung behindern können. Einige dieser Einschränkungen können durch bessere Technologie überwunden werden, andere sind unvermeidlich. Zu den wichtigsten Einschränkungen des autonomen Fahrens gehören beispielsweise die Auswirkungen auf die Umwelt, die Anfälligkeit für Hackerangriffe, Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes und der Effizienz der Technologie. In diesem Abschnitt werden einige dieser Einschränkungen für verschiedene Module der AV-Safety untersucht und der effiziente Betrieb von autonomen Fahrzeugen erleichtert.

2.3.1 Wahrnehmung/Sensor Module

Das Wahrnehmungsmodul ist für das Erfassen und Verstehen der Umgebung des Fahrzeugs zuständig und verwendet verschiedene Sensoren wie Kameras, LiDAR, Radar und Ultraschallsensoren. Es wird eine grosse Anzahl von Deep-Learning-Modellen entwickelt, um die Genauigkeit der Wahrnehmung statischer und der Verfolgung dynamischer Objekte kontinuierlich zu verbessern. Die wichtigsten Algorithmen, die in diesem Modul zum Einsatz kommen, sind:

- *Objektdetektion und -erkennung:* Convolutional Neural Networks (CNNs) werden häufig zur Erkennung von Objekten wie Fahrzeugen, Fussgängern und Verkehrsschildern eingesetzt. Diese Algorithmen verarbeiten Bilder von Kameras, um Objekte zu identifizieren und ihre Position zu bestimmen.
- *Sensor-Fusion:* Kalman-Filter, Partikelfilter oder fortschrittlichere Techniken wie Bayes'sche Netze werden verwendet, um Daten von verschiedenen Sensoren zu fusionieren (z. B. die Kombination von Kamera- und LiDAR-Daten), um ein genaueres Verständnis der Umgebung zu erhalten.
- *Semantische Segmentierung:* Deep-Learning-Modelle wie CNNs werden verwendet, um jeden Pixel in einem Bild einer Klasse zuzuordnen, z. B. Strasse, Fahrzeug, Fussgänger usw., was zum Verständnis des gesamten Szenekontextes beiträgt.
- *Objektverfolgung:* Algorithmen wie Kalman-Filter, Partikelfilter und neuerdings auch Deep-Learning-basierte Tracker werden eingesetzt, um die Bewegung von erkannten Objekten über die Zeit zu verfolgen und ihre zukünftige Position vorherzusagen.

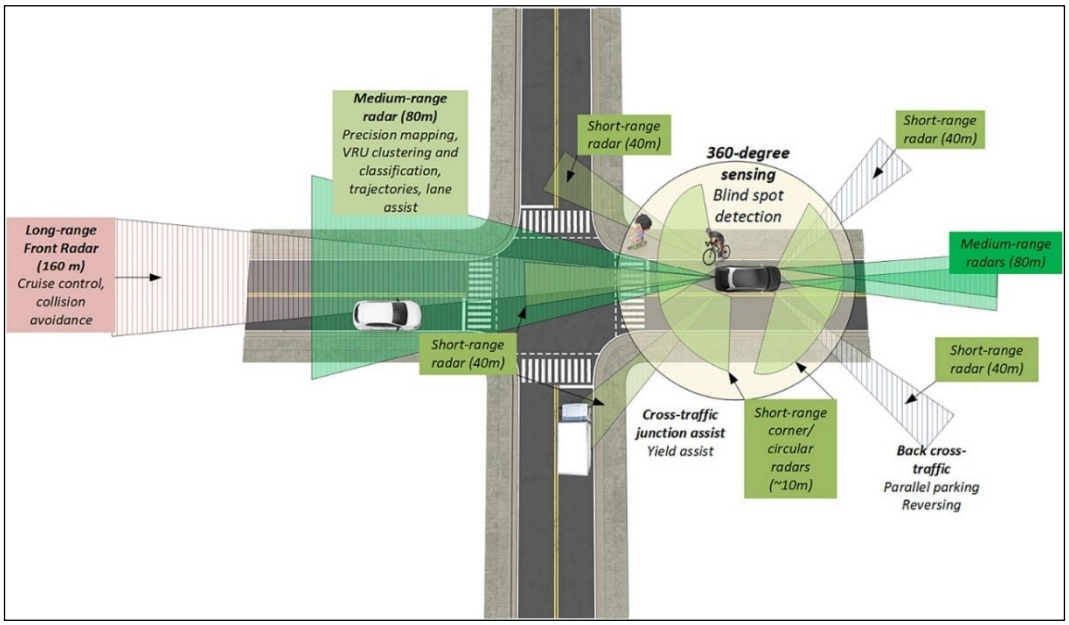

Abbildung 11: Erfassungsbereich und Anwendungsfälle verschiedener AV-Automobilradare [11]

Die Wahrnehmungsmöglichkeiten werden jedoch durch mehrere Einschränkungen beeinträchtigt:

- *Ungünstige Wetterbedingungen:* Sensoren wie Kameras und LiDAR haben unter Bedingungen wie starkem Regen, Nebel oder Schnee Probleme. So kann die Sichtbarkeit von Kameras eingeschränkt sein, und LiDAR kann durch Reflexionen oder Streuung von Licht beeinträchtigt werden, was zu einer falschen oder

unvollständigen Wahrnehmung der Umgebung führt [40]. Das Verkehrszeichen kann bei schlechtem Wetter nicht erfolgreich erkannt werden. Die von [41] durchgeführte Analyse zeigt, dass das Unfallrisiko bei Regen im Vergleich zu normalen Umgebungsbedingungen um 70 % ansteigt. Darüber hinaus zeigen nationale Statistiken aus den Vereinigten Staaten, dass sich jedes Jahr mehr als 30.000 Fahrzeugunfälle auf verschneiten oder vereisten Strassen oder bei Schneefall oder Eisregen ereignen. Weitere Belege für den Einfluss ungünstiger Witterungsbedingungen auf die Verkehrssicherheit liefert das US-Verkehrsministerium [42]. Deren Aufzeichnungen zufolge ereignen sich jährlich durchschnittlich 5.891.000 Fahrzeugunfälle, von denen etwa 1.235.000 auf widrige Wetterbedingungen wie Schnee, Regen, Nebel und starken Wind zurückzuführen sind [42].

- *Herausforderungen bei der Sensorfusion:* Die Integration von Daten aus mehreren Sensoren, um ein kohärentes Bild der Umgebung zu erhalten, kann eine Herausforderung darstellen. Diskrepanzen zwischen verschiedenen Sensoren können zu einer ungenauen Objekterkennung oder -klassifizierung führen, was wiederum zu unsicheren Fahrentscheidungen führen kann. Zur Verbesserung der Genauigkeit und zur Abwehr von Angriffen auf die bordeigenen Sensoren sind Umgebungsinformationen von Drittanbietern erforderlich, die von strassenseitigen Sensoren stammen.
- *Anfälligkeit für Hackerangriffe:* Das Wahrnehmungsmodul von AVs hängt stark von Deep-Learning-Modellen ab. Hacker haben es auf die sicherheitskritischen Funktionen von Systemen mit künstlicher Intelligenz abgesehen. In einigen Fällen haben Hacker die Strasse bemalt und ein AV dazu gebracht, gegen ein Navigations- oder Stoppschild zu fahren [43]. Neben dem Modell sind auch die Sensoren anfällig für Fälschungen. Indem beispielsweise Licht mit der gleichen Frequenz wie der auf das Ziel reflektierte Laser direkt auf die Scannereinheit zurückgeworfen wird, kann gezeigt werden, wie der LiDAR-Sensor gestört werden kann [44]. Ein ähnlicher Angriff wird in [45] durchgeführt, wo ein LiDAR-Sensor kompromittiert wird.
- *Verdeckungen und blinde Flecken:* Das Wahrnehmungssystem könnte Objekte oder Hindernisse, die sich hinter anderen Objekten (Verdeckungen) oder in toten Winkeln befinden, nicht erkennen, wie in Abbildung 11 dargestellt. Dies ist besonders problematisch in städtischen Umgebungen mit komplexen Strassenszenarien, z. B. an Kreuzungen oder in dicht besiedelten Gebieten [46].

2.3.2 Lokalisierungs Modul

Das Lokalisierungsmodul hilft dem Fahrzeug, seine genaue Position auf der Strasse zu bestimmen. Dies geschieht in der Regel mithilfe von GPS, Trägheitsmessgeräten (IMUs) und manchmal auch mit Kartendaten. Es gibt zwei Hauptströmungen von Lokalisierungsmethoden: Simultane Lokalisierung und Kartierung (SLAM) und GPS-basierte Lokalisierung, wie in Abbildung 12 dargestellt. In der Regel werden diese beiden Methoden kombiniert, um die Genauigkeit der Lokalisierung zu verbessern. SLAM-Algorithmen erstellen eine Karte der Umgebung und verfolgen gleichzeitig die Position des Fahrzeugs innerhalb dieser Karte. Techniken wie Extended Kalman Filter (EKF) SLAM, Particle Filter SLAM und Graph-Based SLAM werden häufig verwendet. Bei GPS-basierten Methoden werden GPS-Signale zur Schätzung der globalen Position des Fahrzeugs verwendet. Zur Verbesserung der Genauigkeit werden häufig Differential-GPS- (DGPS) oder Echtzeit-Kinematik- (RTK) GPS-Verfahren eingesetzt.

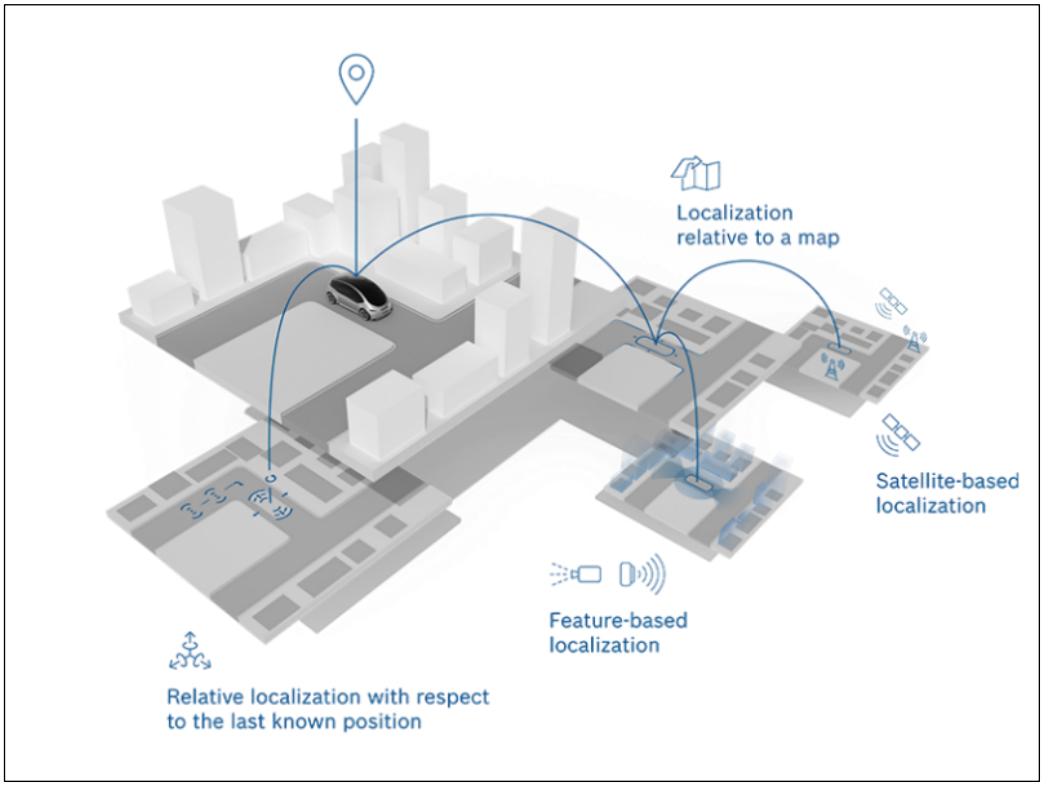

Abbildung 12: Lokalisierungsmethoden [47]

Wie bereits erwähnt, spielen das GPS-Signal und die Kartendaten eine wichtige Rolle, um die Leistung der Lokalisierung zu gewährleisten. Die Lokalisierung ist jedoch nicht ohne Einschränkungen:

- *GPS-Signal-Zuverlässigkeit:* In Strassenschluchten (Gebiete mit hohen Gebäuden) oder Tunneln können die GPS-Signale schwach oder unzuverlässig sein, was zu einer ungenauen Positionsbestimmung führt [48]. Dies kann dazu führen, dass sich das Fahrzeug nicht richtig zur Strasse ausrichtet oder einen falschen Weg einschlägt.
- *Kartengenauigkeit:* Die Abhängigkeit von vorab kartierten Daten bedeutet, dass Fehler oder veraltete Informationen in den Karten zu einer schlechten Lokalisierung führen können. Dies ist vor allem in dynamischen Umgebungen problematisch, in denen sich die Strassenbedingungen oder die Streckenführung häufig ändern [49].
- *Verarbeitung in Echtzeit:* Lokalisierungsalgorithmen benötigen erhebliche Rechenleistung, um Daten in Echtzeit zu verarbeiten, was insbesondere in hochdynamischen Umgebungen, in denen eine schnelle Entscheidungsfindung entscheidend ist, ein limitierender Faktor sein kann [17], [50].

2.3.3 Planungsmodul

Das Planungsmodul ist dafür verantwortlich, den Weg des Fahrzeugs zu bestimmen und in Echtzeit Entscheidungen darüber zu treffen, wie es sicher und effizient durch die Umgebung navigieren kann. Dies umfasst sowohl die globale Pfadplanung (vom Ausgangspunkt zum Ziel) als auch die lokale Planung (Reaktion auf die unmittelbare Umgebung).

Für die globale Planung werden häufig Algorithmen wie Dijkstra, A* (A-star) und seine Varianten (z. B. D* Lite, Hybrid A*) verwendet, um die kürzeste oder effizienteste Route vom aktuellen Standort zum Ziel zu finden.
Die lokale Wegplanung umfasst mehrere Teilaufgaben: Verhaltensplanung, Bewegungsplanung und Trajektorienoptimierung. Finite State Machines (FSM) oder Entscheidungsbäume werden häufig verwendet, um das für verschiedene Fahrszenarien erforderliche Verhalten zu modellieren und vorherzusagen, z. B. Fahrspurwechsel, Zusammenführen oder Ausweichen vor anderen Fahrzeugen. Anhand des Fahrverhaltens wird ein unmittelbarer Zielpunkt bestimmt und in das Bewegungsplanungsmodell eingegeben, um einen kollisionsfreien Referenzpfad zu generieren, wie in Abbildung 13 dargestellt. Rapidly-exploring Random Trees (RRT), RRT*, Interpolationskurven und andere Bewegungsplanungsmethoden werden verwendet, um Hindernisse zu umfahren und den Pfad des Fahrzeugs in Echtzeit anzupassen. Der vom Bewegungsplanungsmodell ausgegebene Referenzpfad entspricht möglicherweise nicht der Fahrzeugdynamik oder ist nicht gleichmässig, wodurch die Fahrgäste beeinträchtigt werden. Daher wird die Bahnoptimierung die Referenzbahn mit Hilfe der dynamischen Programmierung (DP) oder der modellprädiktiven Steuerung (MPC) weiter optimieren, um eine sicherere, komfortablere und effizientere Bahn zu erhalten.

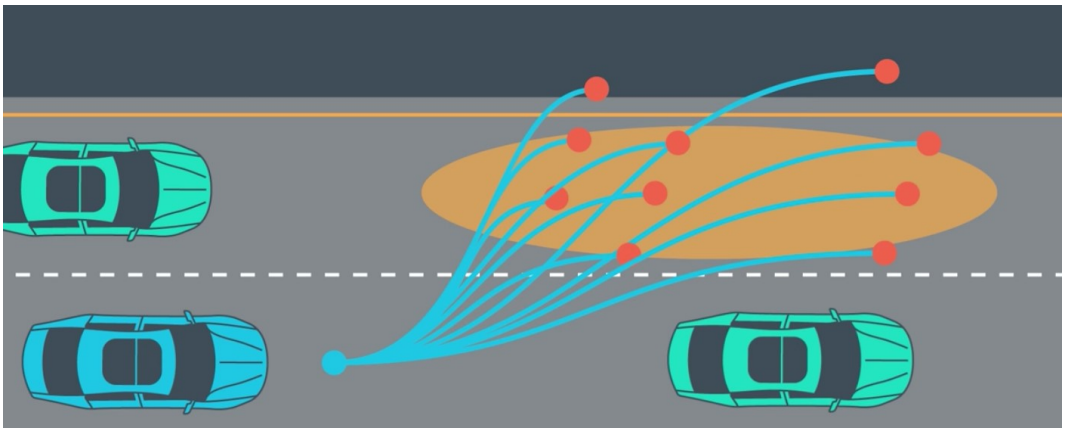

Abbildung 13: Erzeugen eines gleichmässigen Vektors, der das Auto ans Ziel bringt [51]

Das Planungsmodul leidet jedoch unter den folgenden Problemen:

- *Umgang mit unvorhersehbaren Szenarien:* Autonome Fahrzeuge haben oft Schwierigkeiten, das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer, wie Fussgänger oder unberechenbare Fahrer, vorherzusagen. Diese Unvorhersehbarkeit kann zu suboptimalen oder unsicheren Planungsentscheidungen führen [52], [53]. Neben dem Verhalten dynamischer Verkehrsteilnehmer schränkt das Fehlen wichtiger Daten wie Ampelschaltzeiten und Strassensperrungen die Fähigkeit ein, optimale Routen zu planen oder angemessen auf veränderte Bedingungen zu reagieren.
- *Komplexe Entscheidungsfindung:* In Situationen, die ethische oder moralische Urteile erfordern (z. B. die Wahl zwischen zwei schädlichen Folgen), fehlt dem Planungsmodul die menschenähnliche Intuition, und es kann schwierig sein, die sicherste Entscheidung zu treffen [54], [55].
- *Skalierbarkeit von Algorithmen:* Mit zunehmender Komplexität der Fahrumgebung (z. B. in überfüllten Stadtgebieten) müssen die Planungsalgorithmen eine

grosse Anzahl von Variablen berücksichtigen, was rechenintensiv sein und die Entscheidungsfindung in Echtzeit verlangsamen kann [50].

2.3.4 Steuermodul

Das Steuermodul ist für die Ausführung der geplanten Trajektorie verantwortlich, indem es die Lenkung, die Beschleunigung und die Bremssysteme des Fahrzeugs steuert. Es stellt sicher, dass das Fahrzeug dem gewünschten Weg so genau wie möglich folgt. Zu den wichtigsten Algorithmen, die für das Steuermodul verwendet werden, gehören PID-Regelung, MPC und reine Verfolgung. Insbesondere ist die PID-Regelung ein weit verbreiteter Regelalgorithmus beim autonomen Fahren, der den Lenk- oder Gaspedalwinkel basierend auf der Differenz (dem Fehler) zwischen einem gewünschten Ziel (z. B. einer bestimmten Fahrzeugtrajektorie) und dem aktuellen Zustand anpasst. Die modellprädiktive Regelung (MPC) ist eine fortschrittliche Regelungstechnik, die die Eingaben der Fahrzeugsteuerung optimiert, indem sie zukünftige Zustände über einen definierten Zeithorizont vorhersagt. Pure Pursuit ist ein geometrischer Pfadverfolgungsalgorithmus, der zur Lenkungssteuerung in autonomen Fahrzeugen eingesetzt wird. Da das Steuermodul nur selten von Umgebungsinformationen oder den von Sensoren am Strassenrand bereitgestellten Daten beeinflusst wird, wird nicht näher auf dieses Modul eingegangen.

2.4 Wie hilft V2X autonomen Fahrzeugen?

Die Entwicklung autonomer Fahrzeuge (AVs) ist untrennbar mit den Fortschritten in den Vehicle-to-Everything (V2X)-Kommunikationstechnologien verbunden. Abbildung 14, stellt die SAE-Automatisierungsstufen dar und veranschaulicht, wie die zunehmenden Automatisierungsstufen in AVs – von der Fahrerassistenz (Stufe 1) bis zur Vollautomatisierung (Stufe 5) – mit der Rolle und Bedeutung der V2X-Technologien bei der Verbesserung sowohl der Fahrzeugsicherheit als auch der Mobilität korrelieren.

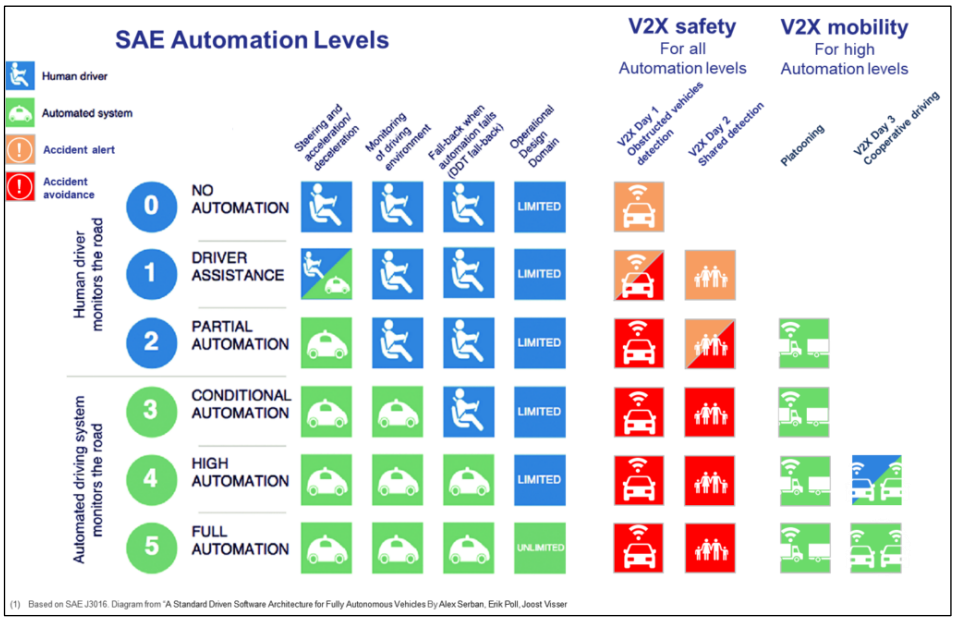

Abbildung 14: Die Rolle von V2X in der Fahrzeugautomatisierung [56]

2.4.1 SAE-Automatisierungsstufen und V2X-Integration

Mit dem Übergang von Fahrzeugen von Stufe 0 (keine Automatisierung) zu Stufe 5 (Vollautomatisierung) nimmt die Abhängigkeit von automatisierten Systemen zur Überwachung und Reaktion auf die Fahrumgebung erheblich zu. Auf den unteren Stufen (1-2), auf denen menschliche Fahrer noch eine entscheidende Rolle spielen, dient die V2X-Kommunikation in erster Linie als ergänzendes Instrument, das dem Fahrer wichtige Informationen zur Verfügung stellt. So kann V2X beispielsweise Warnmeldungen über potenzielle Gefahren wie plötzliche Stopps oder Hindernisse vor dem Fahrzeug liefern, die der Fahrer jedoch weiterhin interpretieren und entsprechend handeln muss [57].

Bei höheren Automatisierungsstufen (3-5), bei denen das automatisierte Fahrsystem des Fahrzeugs in den meisten Situationen die volle Kontrolle übernimmt, wird die V2X-Technologie unerlässlich, um einen sicheren und effizienten Betrieb des Fahrzeugs ohne menschliches Eingreifen zu ermöglichen. Für diese höheren Automatisierungsstufen werden V2X-Mobilitätsdienste wie dynamisches Verkehrsmanagement [58] und Echtzeit-Routenoptimierung [59] immer wichtiger. Diese Dienste basieren auf dem nahtlosen Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur, um sicherzustellen, dass das AV in komplexen und dynamischen Umgebungen fundierte Entscheidungen treffen kann. Dies ist besonders nützlich in Szenarien, in denen die Sensoren des AV möglicherweise nur eine eingeschränkte Sicht haben oder wenn es notwendig ist, Handlungen anderer Verkehrsteilnehmer vorherzusehen.

2.4.2 Verbesserung für AVs

Die V2X-Kommunikation (Vehicle-to-Everything) verbessert die Fähigkeiten autonomer Fahrzeuge erheblich, indem sie die inhärenten Einschränkungen in den Wahrnehmungs-, Lokalisierungs-, Planungs- und Steuermodulen behebt. Durch die Erleichterung des Austauschs von Echtzeitdaten zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur trägt V2X dazu bei, die Herausforderungen zu bewältigen, mit denen diese Module isoliert konfrontiert sind. So hilft V2X jedem Modul:

2.4.3 Wahrnehmungsmodul

- *Überwindung von Sensoreinschränkungen:* V2X liefert zusätzliche Umgebungsdaten, die die bordeigenen Sensoren wie Kameras, LiDAR und Radar ergänzen. So kann V2X beispielsweise Informationen über Gefahren ausserhalb der Sichtlinie des Fahrzeugs liefern, wie z. B. einen Fussgänger, der hinter einem Hindernis die Strasse überquert, oder ein Fahrzeug, das um eine unübersichtliche Kurve fährt. Dadurch werden die Auswirkungen von Verdeckungen und toten Winkeln reduziert.
- *Minderung von Witterungseinflüssen:* V2X ermöglicht es Fahrzeugen, in Echtzeit Aktualisierungen von der Strasseninfrastruktur oder anderen Fahrzeugen über Wetterbedingungen, Strassenoberflächenbedingungen oder Sichtprobleme zu erhalten. Die externen Daten ergänzen die Fahrzeugsensoren, die bei ungünstigen Witterungsbedingungen beeinträchtigt werden könnten, und verbessern so die Wahrnehmungsfähigkeiten des Fahrzeugs.
- *Erweiterung der Objekterkennung und -verfolgung:* Durch den Empfang bestätigender Daten von umliegenden Fahrzeugen oder der Infrastruktur hilft V2X bei der Bestätigung der Anwesenheit und Bewegung von Objekten, was zu einer

genaueren Erkennung und Verfolgung führt, insbesondere in komplexen oder dynamischen Umgebungen.

2.4.4 Lokalisierungsmodul

- *Verbesserung der GPS-Zuverlässigkeit:* V2X kann GPS-Signale durch die Nutzung von Daten von Fahrzeugen in der Nähe oder Roadside Units (RSUs) ergänzen, um eine genauere Positionierung zu ermöglichen. Dies ist besonders in Strassenschluchten oder Tunneln nützlich, in denen GPS-Signale schwach oder unzuverlässig sind.
- *Kartenaktualisierungen in Echtzeit:* Durch V2X können Fahrzeuge Echtzeit-Updates für digitale Karten erhalten, die Änderungen der Strassenführung, Baustellen oder temporäre Hindernisse widerspiegeln. Dadurch wird sichergestellt, dass das Lokalisierungsmodul über die aktuellen Informationen verfügt, wodurch das Risiko von Fehlern aufgrund veralteter Kartendaten verringert wird.
- *Verbesserte Positionierungsgenauigkeit:* V2X ermöglicht differenzielle Korrekturen der GPS-Positionierung, z. B. durch RTK-Korrekturen (Real-Time Kinematic), die die Lokalisierungsgenauigkeit des Fahrzeugs erheblich verbessern.

2.4.5 Planungsmodul

- *Optimierte Routenplanung:* Die V2X-Kommunikation liefert Verkehrsinformationen in Echtzeit, z. B. zu Staus, Strassensperrungen und dem Status von Verkehrsampeln. Dadurch kann das Planungsmodul Routen dynamisch optimieren, Verzögerungen vermeiden und einen reibungsloseren Verkehrsfluss gewährleisten.
- *Umgang mit unvorhersehbaren Szenarien:* V2X ermöglicht es Fahrzeugen, miteinander und mit der Infrastruktur zu kommunizieren, um das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer besser vorhersagen und darauf reagieren zu können. Wenn das Planungsmodul beispielsweise die Absichten von Fahrzeugen in der Nähe kennt (z. B. ein Auto, das einen Spurwechsel plant), kann es sicherere und fundiertere Entscheidungen treffen.

- *Kooperatives Manövrieren:* V2X ermöglicht kooperative Fahrstrategien wie Platooning oder koordinierte Spurwechsel, bei denen mehrere Fahrzeuge zusammenarbeiten, um den Verkehrsfluss und die Sicherheit zu optimieren. Dadurch wird die Rechenlast des Planungsmoduls reduziert, sodass es sich auf andere kritische Aufgaben konzentrieren kann.

Daher werden verschiedene Module durch verschiedene Anwendungen und Dienste verbessert, die durch V2X ermöglicht werden und in Tabelle 2 zusammengefasst sind.

Anwendungen und Dienste ermöglicht durch V2X

Applications/ Services	Perception	Localization	Planning	Required Infrastructure
Cooperative Sensing	✓			V2X communication, weather sensors, roadside sensors, edge computing, RSUs
Cooperative Localization	✓	✓		V2X communication, RSUs, roadside sensors, edge computing
Intersection Management	✓	✓	✓	V2X communication, RSUs, smart traffic lights, roadside sensors
Real Time Map Update		✓	✓	V2X communication, RSUs, cloud infrastructure, roadside sensors, edge computing
Dynamic Route Planning		✓	✓	V2X communication, RSUs, roadside sensors, edge computing
Platooning		✓	✓	V2X communication, RSUs, roadside sensors, edge computing
Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)		✓	✓	V2X communication, RSUs, roadside sensors, edge computing
Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA)		✓	✓	V2X communication, RSUs, smart traffic lights, edge computing
Eco Driving and Eco Routing			✓	V2X communication, RSUs, edge computing
Remote Driving and Teleoperation	✓	✓	✓	V2I communication, roadside sensors, RSUs, cloud infrastructure
Remote Diagnostics and Software Updates	✓	✓	✓	V2I communication, RSUs, cloud infrastructure
In-Vehicle Infotainment and Services				RSUs, 5G network infrastructure, edge servers
Parking Assistance	✓	✓	✓	V2X communication, RSUs, roadside sensors, edge computing
Road Hazard Warnings		✓	✓	V2X communication, roadside sensors, RSUs
Work Zone Management		✓	✓	V2X communication, roadside sensors, RSUs
Emergency Vehicle Notification	✓	✓	✓	V2X communication, roadside sensors, RSUs

Tabelle 2: Anwendungen und Dienste, die durch V2X ermöglicht werden und verschiedene Module von AVs verbessern.

2.5 Operational Design Domain für Infrastruktur

Der Bereich „Operational Design Domain (ODD)“ ist eine Beschreibung der spezifischen Betriebsbedingungen, unter denen das automatisierte Fahrsystem ordnungsgemäss funktionieren soll, einschliesslich, aber nicht beschränkt auf Strassentypen, Geschwindigkeitsbereiche, Umweltbedingungen (Wetter, Tag/Nacht usw.), geltende Verkehrsgesetze und -vorschriften sowie andere Einschränkungen des Bereichs (vgl. Tabelle 3). Koopman und Fratrik weisen darauf hin, dass die Liste der „anderen“ Einschränkungen des Bereichs umfangreich sein kann und ohne umfangreiche Erfahrung schwer zu erfassen ist [60].
Im Zusammenhang mit der Strasseninfrastruktur bezieht sich die ODD auf die spezifischen Bedingungen und Umgebungen, unter denen die Strasseninfrastruktur für den sicheren und effektiven Betrieb autonomer Fahrzeuge (AVs) ausgelegt ist. Die ODD beschreibt die Fähigkeiten und Grenzen der Infrastruktur unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren, die die Leistung von AVs beeinflussen. Zu diesen Faktoren gehören physische Eigenschaften, Umweltbedingungen und in das Strassennetz integrierte digitale Systeme [24].

Infrastruktur Attribute von ODD

Infrastruktur Attribut	Subattribut	Bemerkung
Strasse	Strassentyp	Grundlegende Strassentypen wie Autobahn, Schnellstrasse, Strasse, Privatstrasse geben die Trennung der Fahrbahnen, die Kreuzungsanordnung, die Arten der Verkehrsteilnehmer usw. an.
	Besondere Strassenabschnitte	Zusätzliche Anforderungen für kritische Strassenabschnitte wie Tunnel, Brücken, Mautstellen usw.
	Trennung von automatisierten Fahrzeugen	Eigene Fahrspuren oder Bereiche; dauerhaft oder vorübergehend, z. B. nur nachts
	Strassenbelag	Leichte Erkennbarkeit der Fahrbahn
	Tragfähigkeit	Strasse (Fahrspuren, Seitenstreifen), Brücken - kritisch für Züge
Geschwindigkeitsbereich	Geschwindigkeitsbegrenzung oder -empfehlung	Die Geschwindigkeiten, für die das automatisierte Fahrsystem ausgelegt sind. Entweder statische oder dynamische Geschwindigkeitsbegrenzungen/-empfehlungen. Die dynamischen beziehen sich auf das Verkehrsmanagement.
Schultern oder Bordsteinkanten	Breite Schultern	Möglichkeit zur Nutzung als „sicherer Hafen“, wenn ODD endet.
	Pannenbuchten oder Parkflächen	Wie oben
	Bereiche zum Aufnehmen und Absetzen von Fahrgästen	Erforderlich für automatische Shuttles und Robotaxis
Fahrbahnmarkierungen	Existenz von Fahrbahnmarkierungen	Seitliche Anordnung
	Sichtbarkeit, Maschinenlesbarkeit	Sichtbarkeit für Fahrzeugsensoren

Infrastruktur Attribut	**Subattribut**	**Bemerkung**
	Markierungen, die auf die Nutzung durch automatisierte Fahrzeuge hinweisen	Hinweis auf das Nutzungsrecht oder das Nutzungsverbot für hochautomatisierte Fahrzeuge
Verkehrszeichen	Sichtbarkeit, Maschinenlesbarkeit	Sichtbarkeit für Fahrzeugsensoren
	Schilder, die auf die Benutzung durch automatisierte Fahrzeuge hinweisen	Hinweis auf das Recht zur Benutzung oder das Verbot der Benutzung durch hochautomatisierte Fahrzeuge
Strassenmöblierung	Wahrzeichen	Statische physische Wahrzeichen, die möglicherweise mit Sensorreflektoren oder Funkbaken oder Ähnlichem ausgestattet sind, um eine genaue Ortung zu ermöglichen
	Schilderbrücken für Strassenschilder	Anzeige des Nutzungsrechts oder Nutzungsverbots für hochautomatisierte Fahrzeuge
	Tore und Schranken	Zugang zu speziellen Fahrspuren, Strassen oder Bereichen
	Strassenbeleuchtung	Unterstützung für das Sichtsystem des automatisierten Fahrzeugs
	Wildschutzzäune	Verfügbarkeit und Zustand
Instandhaltung der Infrastruktur	Winterdienst (Schneeräumung, Enteisung)	Sichtbarkeit von Strassenmarkierungen und Verkehrsschildern bei ungünstigen Witterungsverhältnissen
	Strasseninstandhaltung inkl. Anstrich von Strassenmarkierungen, Beseitigung von Vegetation	Qualität und Sichtbarkeit von Strassenmarkierungen und Verkehrsschildern
	Inspektionen der Infrastruktur	Inspektionen nach standardisierten Prüf-/Inspektionsprotokollen sowohl für physische als auch für digitale Infrastruktur
Kommunikation	Kurzstrecken-V2I	Kommunikation an Brennpunkten und Strassenabschnitten
	Mittel- und Langstrecken-V2I	Kommunikation über Strassennetze und -korridore
	Mittel- und Langstrecken-V2I mit geringer Latenz und grosser Bandbreite	Kommunikation, die die Fernüberwachung von Fahrzeugen erleichtert
Satellitenortung	Landstationen	Verbesserung der Ortungsgenauigkeit in schwierigen Gebieten
	Unterstützung der Ortung in Tunneln	GPS-Repeater oder andere Lösungen für eine genaue Ortung auch in Tunneln
HD-Karte	Karten der Strassenumgebung mit Orientierungspunkten für Kamera-, Radar- und Ultraschallsensoren	Genaue Positionierung des Fahrzeugs im Verkehrssystem, auf der Strasse und der Fahrbahn
	Karten der Strassenumgebung mit Orientierungspunkten für LiDAR-Sensoren	Genaue Positionierung des Fahrzeugs im Verkehrssystem, auf der Strasse und auf der Fahrbahn
Informationssystem (digitale Schicht der HD-Karte)	Echtzeit-Ereignisse, Baustellen, Zwischenfälle und andere Störungen	Bereitstellung eines erweiterten Horizonts über die Sensorreichweite hinaus

Infrastruktur Attribut	Subattribut	Bemerkung
	Digitale Verkehrsregeln und Vorschriften	Nachweis von permanenten und temporären Betriebsregeln
	Geofencing-Informationen	Informationen über den Zugang zu bestimmten Strassen, Netzen und Gebieten und/oder Nutzungsrechte für bestimmte Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens
	Verfügbarkeit der physischen Infrastruktur	Echtzeitinformationen über die Verfügbarkeit und Nutzbarkeit der für ODD erforderlichen physischen Infrastruktur
Status der Verkehrsleistung im Strassennetz	Verkehrsstatus im Netz	Liefert dem Verkehrssystem Echtzeit-Verkehrsstatusinformationen auf der HD-Karte
	Digitaler Echtzeit-Zwilling des verwalteten Netzes einschliesslich der Verkehrsströme	Ermöglicht die Simulation, Modellierung und Erprobung verschiedener Verkehrsmanagementmassnahmen zur Auswahl optimaler Massnahmen für die Fahrzeugströme, einschliesslich der CAVs
Verkehrsmanagement	Baustellenmanagement	Standardisierte Markierungen und Prozesse zur Aufrechterhaltung der ODD
	Störfallmanagement	Standardisierte Markierungen und Prozesse zur Aufrechterhaltung der ODD
	ODD-Management	Management von Faktoren, die sich auf die ODD von Fahrzeugen auf der Strasse auswirken
	Verkehrsmanagementzentrum und -prozesse	Anpassung der Zentren und Prozesse an die besonderen Anforderungen von automatisierten Fahrzeugen und gemischten Flotten
Flottenüberwachung	Flottenüberwachungs- und Kontrollzentren	Fernüberwachung und -kontrolle von Flotten, wahrscheinlich notwendig für Shuttles, Robotaxis, Baustellenanhänger, Wartungsfahrzeuge

Tabelle 3: Merkmale der physischen Infrastruktur – nach Vorschlag von EU EIP & MANTRA [61]

Obwohl ODD noch lange nicht harmonisiert sind, sind sie das akzeptierte Konzept zur Definition der spezifischen Betriebsbedingungen, unter denen das automatisierte Fahrsystem ordnungsgemäss funktionieren soll. Dennoch sind ODD in gewisser Weise die Sprache der Automobilindustrie, um die Anforderungen ihrer automatisierten Funktionen zu definieren. Dieses Thema wird im INFRAMIX-Projekt mit dem Vorschlag des sogenannten Konzepts der Infrastrukturunterstützungsstufen für automatisiertes Fahren [62] behandelt. Die ISAD-Ebenen könnten als Antwort der NRB auf ODD angesehen werden, um eine klare Orientierung zu bieten. Der aktuelle Stand des Vorschlags des INFRAMIX-Projekts zur Definition der ISAD-Ebenen ist in Abbildung 15 zusammengefasst.

	Level	Name	Description	Digital information provided to AVs			
				Digital map with static road signs	VMS, warnings, incidents, weather	Microscopic traffic situation	Guidance: speed, gap, lane advice
Conventional infrastructure	E	Conventional infrastructure / no AV support	Conventional infrastructure without digital information. AVs need to recognise road geometry and road signs.				
	D	Static digital information / Map support	Digital map data is available with static road signs. Map data could be complemented by physical reference points (landmarks signs). Traffic lights, short term road works and VMS need to be recognized by AVs.	X			
Digital infrastructure	C	Dynamic digital information	All dynamic and static infrastructure information is available in digital form and can be provided to AVs.	X	X		
	B	Cooperative perception	Infrastructure is capable of perceiving microscopic traffic situations and providing this data to AVs in real-time.	X	X	X	
	A	Cooperative driving	Based on the real-time information on vehicle movements, the infrastructure is able to guide AVs (groups of vehicles or single vehicles) in order to optimize the overall traffic flow.	X	X	X	X

Abbildung 15: Stufen der Infrastrukturunterstützung für automatisiertes Fahren (ISAD-Stufen) [63]

Um ISAD-Level A zu erreichen, ist sowohl die physische als auch die digitale Infrastruktur zu berücksichtigen. Im Folgenden wird die physische Infrastruktur beschrieben.

Physische Infrastruktur

- Strassentyp: Verschiedene Strassentypen, wie Autobahnen, Stadtstrassen und Landstrassen, weisen jeweils unterschiedliche Gestaltungsmerkmale auf, die sich auf den Betrieb von AVs auswirken. Die ODD wird festlegen, welche Strassentypen für die Unterstützung von AVs ausgerüstet sind, basierend auf Faktoren wie Fahrbahnmarkierungen, Strassenbreite und Krümmung.
- Verkehrszeichen und Signale: Die Sichtbarkeit, Platzierung und Konsistenz von Verkehrszeichen und Signalen sind für AVs von entscheidender Bedeutung. Die ODD enthält Spezifikationen dafür, wie diese Elemente gestaltet und gewartet werden sollten, um sicherzustellen, dass sie von AV-Sensoren erkannt und interpretiert werden können.
- Strassenmarkierungen: Klare, standardisierte Strassenmarkierungen sind für die Querführung und Spurhaltung von AVs unerlässlich. Die ODD definiert die Qualitäts- und Wartungsstandards für Strassenmarkierungen und stellt sicher, dass sie unter verschiedenen Bedingungen sichtbar sind.
- Oberflächenqualität: Der Zustand der Strassenoberfläche, einschliesslich der Glätte und der Abwesenheit von Schlaglöchern oder Schutt, ist für die Sicherheit und den Komfort von AVs von entscheidender Bedeutung. Die ODD legt akzeptable Oberflächenbedingungen und die erforderlichen Instandhaltungsverfahren fest.

Auch die Umgebungsbedingungen sollten wie folgt berücksichtigt werden.

Umgebungsbedingungen

- Wetterbeständigkeit: Die ODD befasst sich damit, wie die Strasseninfrastruktur AVs bei unterschiedlichen Wetterbedingungen wie Regen, Schnee, Nebel oder extremen Temperaturen unterstützt. Dazu gehört die Verwendung wetterfester Materialien und Technologien, die AVs Wetterinformationen in Echtzeit liefern.
- Beleuchtung: Eine angemessene Beleuchtung, insbesondere bei schlechten Sichtverhältnissen, ist Teil der ODD. Dazu gehören Strassenbeleuchtung sowie reflektierende Materialien auf Schildern und Markierungen, um sicherzustellen, dass sie nachts oder bei schlechtem Wetter für AVs sichtbar sind.

Digitale Infrastruktur

Wie in den vorherigen Abschnitten dargelegt, spielt die digitale Infrastruktur eine entscheidende Rolle in der ODD für die Strasseninfrastruktur, insbesondere im Zusammenhang mit der V2X-Kommunikation. Die Infrastruktur muss den Echtzeit-Datenaustausch zwischen Fahrzeugen und Roadside Units (RSUs) unterstützen, damit AVs Aktualisierungen zu Verkehrsbedingungen, Strassengefahren und Signalzeiten erhalten können. Diese digitale Ebene umfasst auch hochauflösende Kartierungssysteme, die AVs detaillierte und genaue Informationen über das Strassennetz liefern und eine präzise Lokalisierung und Navigation gewährleisten.

Integration Infrastrukturelemente

Darüber hinaus muss die ODD die Integration spezialisierter Infrastrukturelemente berücksichtigen, wie z. B. spezielle Fahrspuren für autonome Fahrzeuge, Ladestationen für elektrische AVs und intelligente Verkehrsmanagementsysteme, die den Verkehrsfluss auf der Grundlage von Echtzeitdaten dynamisch steuern können. Diese Elemente sind besonders wichtig in Gebieten mit hoher Verkehrsdichte oder in denen erwartet wird, dass AVs in einem hochautomatisierten Modus betrieben werden, wie z.B. in städtischen Zentren oder entlang wichtiger Verkehrskorridore.
Bei der physischen Infrastruktur im Zusammenhang mit der Strasse, wie Verkehrsschilder und Fahrbahnmarkierungen, gibt es nur wenige Bereiche, die verbessert werden können, da sie schon seit langem festgelegt sind, und die meisten KI-Algorithmen sind darauf ausgelegt, die Genauigkeit ihrer Erkennung zu verbessern. Die direkte Verbesserung besteht darin, sie miteinander zu verbinden. Für den Strassentyp, die Verkehrssignale, Verkehrsschilder und Fahrbahnmarkierungen sollten die statischen Informationen, wie die Krümmung der Fahrbahn, die Position der Verkehrssignale und die Bedeutung der Verkehrsschilder, in der HD-Karte gespeichert und über V2X an die Fahrzeuge gesendet werden. Dynamische Informationen, wie z. B. die Ampelschaltung, sollten ebenfalls vom Netzwerk erfasst und über V2X an das Fahrzeug gesendet werden. Sobald sie verbunden sind, gelten sie als digitale Infrastruktur. Daher konzentriert sich der weitere Verlauf dieses Berichts hauptsächlich auf die digitale Infrastruktur, die dazu beitragen kann, dass AVs über mehr Informationen verfügen und die Funktionalitäten weiter verbessert werden.

2.6 Roadside Devices / Geräte am Strassenrand (RSD)

Im Zusammenhang mit autonomen Fahrzeugen (AVs) sind RSD's von entscheidender Bedeutung für den Betrieb dieser Fahrzeuge, indem sie wichtige Daten bereitstellen, die Kommunikation ermöglichen und bei Rechenaufgaben helfen. Diese Geräte lassen sich grob in Sensoren, Computer und Kommunikationsgeräte einteilen. Jede Kategorie spielt eine eigene Rolle bei der Verbesserung der Fähigkeiten von AVs, insbesondere in Umgebungen, in denen Bordsysteme möglicherweise an ihre Grenzen stossen.

Sensoren

Sensoren sind unerlässlich für die Erfassung von Daten über die Fahrzeugumgebung, die für die Navigation, Sicherheit und Entscheidungsfindung von entscheidender Bedeutung sind. Laut dem Bericht des Bundesrats [64] ist die Integration hochwertiger, genauer Daten von Verkehrssensoren und dynamischer Echtzeitdaten für den effektiven Betrieb autonomer Fahrzeuge (AVs) unerlässlich. Sensoren am Strassenrand müssen die bordeigenen Sensoren von AVs ergänzen, um ein umfassendes Verständnis der Umgebung zu ermöglichen [65]. Zu den am häufigsten verwendeten Sensoren am Strassenrand gehören Kamera-, LiDAR-, Radar- und Schleifendetektoren. Tabelle 4 bietet einen konsolidierten Vergleich der Stärken und Schwächen verschiedener Sensortypen sowie möglicher Sensorfusionsmöglichkeiten.

Eigenschaften von Sensoren am Strassenrand

Pros / Cons / Mitigation	Kamera	LiDAR	Radar	Sensoren mit Induktionsschleife
Pros	Genaue Objekterkennung	Genaue Entfernungsmessung Bessere Objektklassifizierung	Betrieb bei schlechter Sicht Unempfindlich gegen Witterungseinflüsse	Genaue Zählung von Fahrzeugnummern Ausgereift und hochentwickelt Geringe Kosten
Cons	Mangel an genauer Tiefenwahrnehmung Schlechte Bedienung bei schlechter Sicht	Schwierige Objektklassifizierung Berechnungsintensive Daten Knapper Datensatz	Falsche Erkennungen in geclusterten Gruppen Anfällige Ungenauigkeit bei der Klassifizierung von Verkehrsteilnehmern aufgrund der geringen Größe	Schlechte Leistung bei schlechten Straßenverhältnissen Das Eindringen von Wasser beeinträchtigt die Leistung Aufwändige Installation
Mögliche Lösungen	Computervision-basierte Segmentierung, Erkennung und Verfolgung von Objekten.	Integration mit Kameras zur Verbesserung der Erkennung von Objekten mit großer bis mittlerer Reichweite. Integration mit Radargeräten	Verschmelzung von Radar- und LiDAR-Punktwolken für eine robustere Cluster-Erkennung	Installieren von mehreren Detektoren für einen Standort.

Pros / Cons / Mitigation	Kamera	LiDAR	Radar	Sensoren mit Induktions-schleife
		zur Verbesserung der Falschradarerkennung und der Kollisionsvermeidung		
Installation	Nicht eingreifend	Nicht eingreifend	Nicht eingreifend	Eingreifend
Messung der Entfernung	[66], [67], [68], [69], [70], [71]	[72], [73], [74], [75]	[66], [67], [76], [77], [78]	N.A.
Schätzung der Geschwindigkeit	[79], [80], [81], [82], [83]	[74], [84], [85]	[77], [86], [87]	N.A.
Verbesserung der Sichtbarkeit	[88], [89], [90], [91], [92]	[93], [94], [95], [96]	[97], [98], [99]	N.A.
Klassifizierung und Verfolgung	[100], [101], [102], [103], [104]	[84], [105], [106], [107], [108]	[78], [109], [110], [111], [112]	N.A.

Tabelle 4: Vergleich verschiedener Sensoren

Eine typische Bereitstellung und Installation der Sensoren sind in Abbildung 16 dargestellt.

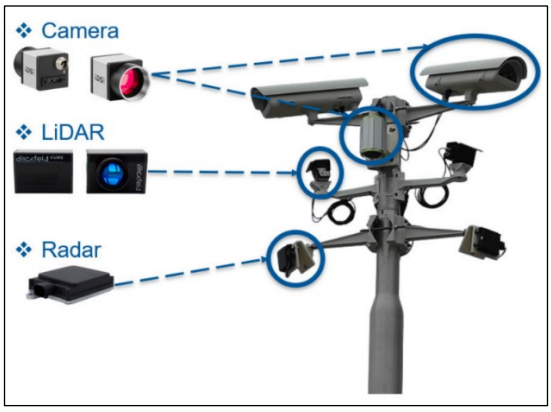

Abbildung 16: Eine Illustration des Sensoreinsatzes am Mast [113].

Da die Funktionalität von Kamera, LiDAR und Radar vergleichbar ist, wird das Radar-Diagramm zum Vergleich dieser drei Sensortypen in **Abbildung 17** dargestellt, die die Vor- und Nachteile dieser Sensoren veranschaulicht.

Kameras

Kameras dienen dazu, visuelle Informationen zur Überwachung von Verkehrsbedingungen [114], Verkehrsschildern [115] und Fussgängerbewegungen [116] zu erfassen. Sie können reichhaltige visuelle Details liefern, wie z. B. die Farbe der Ampeln und Informationen zu den Verkehrsschildern, sind jedoch anfällig für Behinderungen durch schlechte Beleuchtung und ungünstige Wetterbedingungen wie Nebel, Schnee und starken Regen [40], [41], [117], [118].

Die Installation von Kameras ist nicht störend und die Betriebs- und Wartungskosten umfassen hauptsächlich die regelmässige Reinigung und Kalibrierung.
Sie liefern detaillierte visuelle Informationen, die für die Interpretation von Verkehrssignalen, die Erkennung von Hindernissen und die Einhaltung der Verkehrsregeln von entscheidender Bedeutung sind.
Im Vereinigten Königreich werden Kameras in städtischen Testumgebungen, wie z. B. in London und Coventry, in grossem Umfang eingesetzt, um Versuche mit autonomen Fahrzeugen zu unterstützen und das Verkehrsmanagement zu verbessern [119]. Auch Frankreich integriert Kameras in städtischen Gebieten, um eine detaillierte Verkehrsüberwachung und Fussgängererkennung zu ermöglichen und die Sicht von selbstfahrenden Autos zu verbessern [120].
Kameras sind auf städtischen Strassen in der Schweiz sehr effektiv, wo detaillierte visuelle Informationen zum Lesen von Verkehrsschildern, Erkennen von Fussgängern und Erkennen von Strassenmarkierungen benötigt werden. Sie sind auch auf Vorortstrassen für die Nahbereichserkennung von Vorteil.

LiDAR

LiDAR verwendet Laserimpulse, um hochauflösende 3D-Karten der Umgebung zu erstellen. Es ist bei klarem Wetter sehr effektiv, reagiert aber empfindlich auf widrige Bedingungen wie starken Regen oder Nebel [121], [122].
Die Installation ist nicht invasiv, aber der Preis für LiDAR ist hoch [123], [124]. Der Energieverbrauch und der Bedarf an Datenspeicherung von LiDAR ist höher als bei anderen [125], [126]. Die Wartungskosten umfassen hauptsächlich die regelmässige Kalibrierung und Reinigung.
LiDAR-Sensoren liefern detaillierte 3D-Karten [127], die bei der präzisen Spurhaltung [128], der Strassenranderkennung [129] und der Hinderniserkennung und -verfolgung [130] helfen. Dieser hohe Detaillierungsgrad ist besonders nützlich für komplexe Navigationsaufgaben in städtischen Umgebungen und die Unterscheidung zwischen verschiedenen Objekten auf der Strasse.
Frankreich hat stark in die LiDAR-Technologie investiert, insbesondere in städtischen Testzonen wie dem SAM-Projekt, wo sie detaillierte Kartierung und präzise Navigation unterstützt [131]. Auch Deutschland setzt LiDAR in seinen A9-Autobahn-Testfeldern ein, um die Genauigkeit des autonomen Fahrzeugbetriebs zu verbessern [132].
LiDAR-Sensoren eignen sich für städtische Strassen in der Schweiz, wo detaillierte Kartierung und Präzision für die Navigation in komplexen Verkehrsumgebungen [133] und die Gewährleistung der Sicherheit in Gebieten mit hoher Fussgängeraktivität von entscheidender Bedeutung sind.

Radar

Radarsysteme nutzen Radiowellen, um Objekte zu erkennen und ihre Entfernung und Geschwindigkeit zu messen. Das Radar ist in der Lage, widrigen Wetterbedingungen standzuhalten und funktioniert auch bei Regen, Nebel und Schnee gut [99], [134]. Trotz seiner zuverlässigen Leistung bei widrigen Wetterbedingungen ist die Präzision und Erfassungsreichweite von Radarsystemen geringer als die von LiDAR [135]. Darüber hinaus können im Vergleich zu Kameras keine detaillierten Farb- und Verkehrszeichendaten bereitgestellt werden.
Die Installation von Radargeräten ist nicht invasiv und die Betriebs- und Wartungskosten sind moderat, bei hoher Lebensdauer.

Radarsensoren sind für die Objekterkennung und Geschwindigkeitsmessung bei unterschiedlichen Wetterbedingungen unerlässlich und stellen sicher, dass autonome Fahrzeuge auch bei eingeschränkter Sicht das Situationsbewusstsein bewahren. Sie verbessern die Fähigkeit des Fahrzeugs, sich bewegende Objekte zu erkennen und ihre Geschwindigkeit zu messen, was für die Kollisionsvermeidung und sichere Navigation unerlässlich ist.
In Deutschland wurden Radarsensoren in grossem Umfang auf Autobahnen eingesetzt, insbesondere auf der A9, wo sie das Digitale Testfeld Autobahn unterstützen [136]. Auch das Vereinigte Königreich integriert Radarsensoren in seine städtischen Testfelder, um robuste Sicherheitsstandards bei unterschiedlichen Wetterbedingungen zu gewährleisten [137].
Radarsensoren eignen sich besonders für Autobahnen in der Schweiz, da sie bei unterschiedlichen Wetterbedingungen und hohen Geschwindigkeiten effektiv funktionieren. Sie tragen zur Aufrechterhaltung der Sicherheit auf langen Strassenabschnitten bei, auf denen die Wetterbedingungen unvorhersehbar sein können.

Ein Vergleich zwischen Kamera, LiDAR und Radar auf einer Skala von 0 bis 5 der Sensorfähigkeiten in Bezug auf laterale Auflösung, Tiefenwahrnehmung, Geschwindigkeitsmessung, Objektklassifizierung, Wettertauglichkeit und Betrieb bei schwachem Licht wird in Abbildung 17 gegeben.

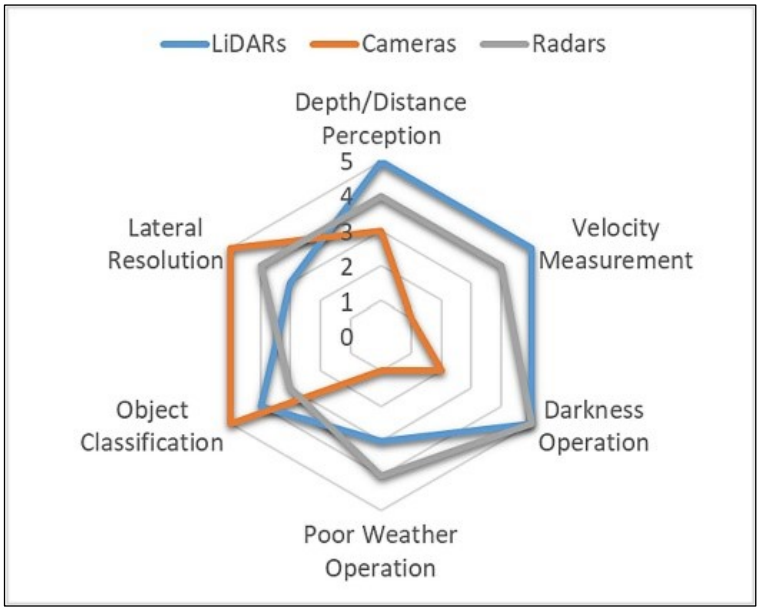

Abbildung 17: Sensorfähigkeiten LiDAR, Kamera, Radar [11]

Induktive Schleifensensoren

Induktive Schleifensensoren sind in die Strassenoberfläche eingelassen, um die Anwesenheit von Fahrzeugen zu erkennen und die Anzahl der Fahrzeuge zu zählen [138], [139]. Sie sind die am häufigsten verwendeten Sensoren, die zuverlässig sind, aber nur über eine begrenzte Reichweite verfügen.

Die Installation von induktiven Schleifensensoren ist invasiv, während die Betriebs- und Wartungskosten niedriger sind als bei anderen Sensoren.
Induktionsschleifensensoren tragen zum Verkehrsmanagement bei, indem sie Echtzeitdaten über die Fahrzeugpräsenz liefern und so die Optimierung der Ampelschaltungen und die Steuerung des Verkehrsflusses unterstützen [140], [141]. Diese Daten können autonome Fahrzeuge auf Änderungen der Verkehrsbedingungen an Kreuzungen und anderen kritischen Punkten hinweisen.
Induktionsschleifensensoren werden in städtischen Gebieten in ganz Europa häufig zur Steuerung des Verkehrsflusses und der Ampelschaltungen eingesetzt. Sie sind in städtischen Testzonen, in denen eine präzise Fahrzeugerkennung für das Verkehrsmanagement von entscheidender Bedeutung ist, unverzichtbar.

2.6.1 Elektronische Geräte, Installationen

Elektronische Geräte am Strassenrand, insbesondere Mobile Edge Computing (MEC)-Einheiten, sind für die Verarbeitung der riesigen Datenmengen, die von Sensoren und AVs erzeugt werden, von entscheidender Bedeutung. Mobile Edge Computing (MEC) ist ein Netzwerkarchitekturkonzept, das Cloud-Computing-Funktionen und eine IT-Serviceumgebung am Rand des Netzwerks, in der Nähe der Quelle der Datenerzeugung, ermöglicht. MEC ist für die Unterstützung der Echtzeit-Verarbeitungsanforderungen autonomer Fahrzeuge von entscheidender Bedeutung. MEC bringt die Rechenleistung näher an die Datenquelle heran, wodurch die Latenzzeit reduziert und die Reaktionsfähigkeit von AV-Systemen verbessert wird. Computing-Geräte am Strassenrand verarbeiten Daten von Sensoren und entlasten autonome Fahrzeuge von Rechenaufgaben [142], [143], [144], wodurch Echtzeit-Entscheidungen ermöglicht und die Systemeffizienz verbessert werden.
Edge-Computing-Geräte verarbeiten Daten lokal, wodurch die Latenzzeit reduziert und eine schnellere Entscheidungsfindung ermöglicht wird. Diese lokale Verarbeitung ist für Echtzeitanwendungen wie Kartenaktualisierungen [145], kooperatives Fahren [146] und zeitnahe Navigationsaktualisierungen [147] von entscheidender Bedeutung. Edge-Computing-Geräte werden zunehmend in städtischen Gebieten in Deutschland und Grossbritannien eingesetzt, wo sie die Echtzeit-Datenverarbeitung für autonome Fahrzeugversuche und Verkehrsmanagementsysteme unterstützen. Edge-Computing-Geräte sind ideal für städtische Strassen in der Schweiz, wo ein hoher Datenverkehr eine sofortige Verarbeitung und geringe Latenzzeiten erfordert. Sie können die komplexen Daten zahlreicher Sensoren verarbeiten und Entscheidungshilfen in Echtzeit bereitstellen.

2.6.2 Kommunikationsgeräte

Kommunikationsgeräte wie Roadside Units (RSUs) sind für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (V2I) unerlässlich, die eine Schlüsselkomponente des umfassenderen Vehicle-to-Everything (V2X)-Kommunikationsrahmens darstellt. Der Bericht des Bundesrats [64] über die Datenanforderungen für das automatisierte Fahren beschreibt die wesentlichen Daten für Echtzeitanwendungen und hochpräzise Sensordaten, die für den Betrieb von AVs von entscheidender Bedeutung sind. Er betont die Notwendigkeit einer sicheren Verkehrsdatenplattform, um diese Anforderungen zu erfüllen.
RSUs bieten Kommunikations- und Datenverarbeitungsfunktionen an strategischen Standorten, die für die V2I-Kommunikation unerlässlich sind [148], [149]. Die

Hauptfunktion einer RSU im Zusammenhang mit der Fahrzeugkommunikation besteht darin, Daten unter Verwendung spezifischer Funkfrequenzen zu senden und zu empfangen, die für intelligente Verkehrssysteme (ITS) zugewiesen sind. RSUs unterstützen autonome Fahrzeuge, indem sie die V2I-Kommunikation ermöglichen und den Echtzeit-Datenaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur ermöglichen. Diese Fähigkeit ist für koordinierte Fahrstrategien, die Verwaltung von Verkehrssignalen und die Verbreitung von Echtzeit-Verkehrsinformationen von entscheidender Bedeutung und erhöht die Sicherheit und Effizienz. RSUs eignen sich sowohl für städtische als auch für Autobahnumgebungen in der Schweiz, wo Echtzeit-Datenverarbeitung und -Kommunikation von entscheidender Bedeutung sind. Sie können strategisch platziert werden, um die Abdeckung und Effizienz zu maximieren.

2.7 Kommunikationsprotokolle und -dienste

Nach der Vorstellung der Geräte, die die Hardware darstellen, wird näher auf die Kommunikationsprotokolle und -dienste eingegangen, die auf diesen Geräten geladen und installiert sind. Kommunikationsprotokolle und -dienste sind grundlegende Komponenten der Infrastruktur, die AVs unterstützt. Diese Protokolle definieren den Kommunikationsstandard, insbesondere die Funkfrequenz und das Format der Nachrichten. Die durch diese Kommunikation bereitgestellten Dienste zielen darauf ab, die Sicherheit, Effizienz und Gesamtleistung von Fahrzeugen zu verbessern.

2.7.1 V2X-Protokolle

Die V2X-Kommunikation umfasst eine Reihe von Technologien, die es Fahrzeugen ermöglichen, mit anderen Fahrzeugen (V2V), der Infrastruktur (V2I), Fussgängern (V2P) und Netzwerken (V2N) zu kommunizieren. Zwei primäre V2X-Kommunikationsprotokolle sind Dedicated Short-Range Communications (DSRC) und Cellular V2X (C-V2X).

Dedicated Short-Range Communications (DSRC)

DSRC ist eine zuverlässige und ausgereifte Technologie für die Kurzstreckenkommunikation, die unter verschiedenen Umgebungsbedingungen effektiv ist. Sie arbeitet im Frequenzband von 5,850 bis 5,925 GHz und bietet eine Kommunikation mit geringer Latenz innerhalb einer kurzen Reichweite von bis zu 1000 Metern. Es ist für die Unterstützung der Hochgeschwindigkeits-Datenübertragung zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur ausgelegt. DSRC [150] bietet autonomen Fahrzeugen Kommunikationsfähigkeiten mit geringer Latenz und kurzer Reichweite, die für den sofortigen Informationsaustausch unerlässlich sind, wie z. B. den Status von Verkehrssignalen, Kollisionswarnungen und Echtzeit-Verkehrsinformationen. Dies verbessert die Fähigkeit des Fahrzeugs, schnelle und fundierte Entscheidungen zu treffen. DSRC wird seit mehreren Jahrzehnten entwickelt und war eine der ersten Technologien, die für die V2X-Kommunikation vorgeschlagen wurden. Sie basiert auf dem IEEE 802.11p-Standard, einer Variante von Wi-Fi, die für Hochgeschwindigkeits-Fahrzeugumgebungen entwickelt wurde [151]. DSRC eignet sich für städtische und vorstädtische Strassen in der Schweiz, wo eine Kommunikation mit kurzer Reichweite und geringer Latenz für die Verwaltung von Kreuzungen und die Bereitstellung von Verkehrsinformationen in Echtzeit erforderlich ist.

Cellular V2X (C-V2X)

C-V2X nutzt Mobilfunknetze für eine breitere Abdeckung und höhere Datenraten. C-V2X ermöglicht eine breitflächige Abdeckung und eine Kommunikation mit hoher Datenrate und unterstützt Interaktionen zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur über grosse Entfernungen, wobei es von der weit verbreiteten Nutzung von Mobilfunknetzen profitiert [148], [152], [153]. Es ist so konzipiert, dass es sowohl mit aktuellen 4G-LTE-Netzen als auch mit zukünftigen 5G-Netzen funktioniert. C-V2X wurde im Rahmen der Standards des 3rd Generation Partnership Project (3GPP) entwickelt und wird zunächst in LTE Release 14 unterstützt und in 5G-Netzen erheblich verbessert [154]. Was die Frequenz betrifft, so arbeitet es im gleichen 5,9-GHz-Band wie DSRC, kann aber auch lizenzierte Mobilfunkbänder nutzen. Diese Technologie ist für Anwendungen wie Routenoptimierung, Ampelschaltungen und die Priorisierung von Einsatzfahrzeugen von entscheidender Bedeutung und verbessert die allgemeine Verkehrseffizienz und -sicherheit. C-V2X eignet sich besonders für Autobahnen in der Schweiz, wo eine Kommunikation mit grosser Reichweite für die Steuerung des Hochgeschwindigkeitsverkehrs und die Koordination zwischen mehreren Fahrzeugen über grössere Entfernungen unerlässlich ist. Die Entstehung und weite Verbreitung von 5G, wie in **Abbildung 18** dargestellt, wird erheblich zur Entwicklung von C-V2X beitragen.

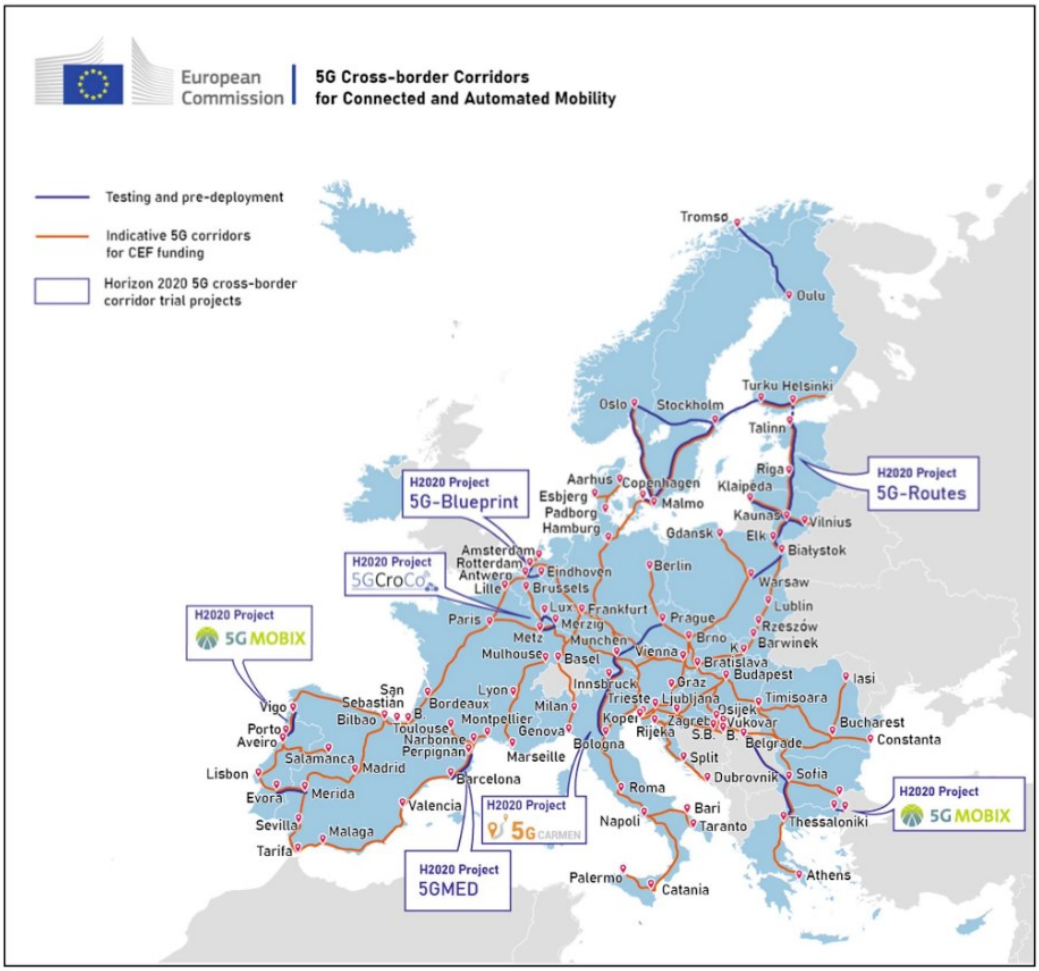

Abbildung 18: Karte der grenzüberschreitenden 5G-Korridorinitiativen in Europa [155]

Die grösste Herausforderung bei der Einführung der V2X-Technologie war der fehlende Konsens unter den Branchenakteuren über das Kommunikationsprotokoll. Die Debatte zwischen WLAN-basiertem DSRC und LTE/5G-basiertem C-V2X hat die V2X-Implementierung erheblich verzögert. Jeder Akteur in der Branche hat seine eigenen Präferenzen, was zu einer anhaltenden Rivalität zwischen diesen beiden Technologien führt. In Nordamerika und China hat man sich weitgehend auf die Verwendung von C-V2X als Standard-V2X-Kommunikationsprotokoll geeinigt und DSRC schrittweise abgeschafft. Europa ist in dieser Frage jedoch nach wie vor gespalten. Volkswagen beispielsweise verwendet DSRC für seine Fahrzeuge [156], während BMW und Daimler C-V2X unterstützen [157]. Glücklicherweise wird diese Kluft immer weniger zu einem Hindernis. In der Erkenntnis, dass ein Konsens in der europäischen Industrie in naher Zukunft unwahrscheinlich ist, haben V2X-Hardwareanbieter, Softwareentwickler und Cybersicherheitsfirmen wie AUTOCRYPT [158] Lösungen entwickelt, die mit beiden Protokollen kompatibel sind. Sowohl DSRC als auch C-V2X nutzen in den EU-Ländern das 5,9-GHz-Frequenzband (vgl. Abbildung 18) für die drahtlose Kurzstreckenkommunikation [159], [160]. Dies ermöglicht es den Akteuren der Branche, die V2X-Bereitstellung fortzusetzen, ohne sich um die Kompatibilität sorgen zu müssen. Trotz dieser Fortschritte sind DSRC und C-V2X auf der Zugriffsebene grundsätzlich nicht interoperabel, was fortschrittlichere Hardware und zusätzlichen Entwicklungsaufwand für die doppelte Kompatibilität erfordert. Dieser hybride Ansatz löst zwar unmittelbare Interoperabilitätsprobleme, wird jedoch nicht als langfristige Lösung angesehen. Viele Experten gehen davon aus, dass eines der beiden Protokolle irgendwann veraltet sein wird und damit die Ära der Hybridlösungen beendet wird.

2.7.2 Datenkommunikationsdienst

Laut [161] sollten die folgenden V2X-Nachrichten zwischen AVs und Infrastruktur übertragen werden.

- *Cooperative Awareness Message (CAM):* Diese Nachrichten helfen, ein Bewusstsein zwischen kooperativen ITS-Stationen (C-ITS) und Fahrzeugen zu schaffen, indem sie Daten wie Position, Geschwindigkeit und andere dynamische Informationen austauschen. CAMs sind von entscheidender Bedeutung für die Verbesserung der Verkehrssicherheit und -effizienz durch Echtzeit-Datenaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur.
- *Dezentrale Umweltbenachrichtigung (DENM):* Diese Nachrichten warnen Fahrzeuge vor Gefahren auf der Strasse oder ungewöhnlichen Verkehrsbedingungen wie Unfällen oder Baustellen. Sie spielen eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der Verkehrssicherheit, indem sie rechtzeitig Informationen zur Unfallvermeidung bereitstellen.
- *Fahrzeuginterne Informationsnachricht (IVIM):* Diese Nachrichten übermitteln infrastrukturbasierte Verkehrsdienste an Fahrzeuge. IVIM umfasst Geschwindigkeitsbegrenzungen, Verkehrssignale und andere relevante Informationen.
- *Signal Phase and Time Message (SPATEM):* Liefert Informationen über den Status und die Schaltzeiten von Ampeln, einschliesslich der minimalen, maximalen und wahrscheinlichen Zeitpunkte für Ampelschaltungen. Dies hilft Fahrzeugen, ihre Geschwindigkeit zu optimieren und Wartezeiten an Kreuzungen zu reduzieren.

In der EU gibt es viele Projekte, die sich mit den Standards von V2X-Nachrichten befassen, wie z. B. C-Roads [162] und das Car2Car Communication Consortium (C2C-CC) [163].

2.7.3 Cybersicherheitsprobleme bei V2X

Die Abhängigkeit von konstanten und sicheren Kommunikationskanälen von V2X bringt erhebliche Herausforderungen für die Cybersicherheit mit sich. Die Integrität, Verfügbarkeit und Vertraulichkeit der in V2X-Systemen ausgetauschten Daten sind von grösster Bedeutung, da jede Beeinträchtigung schwerwiegende Folgen haben könnte, darunter Verkehrsstörungen, Unfälle und Verletzungen des Schutzes personenbezogener Daten.

- *Datenintegrität und -authentizität:* V2X-Systeme sind stark von der Genauigkeit und Authentizität der ausgetauschten Daten abhängig. Angreifer könnten falsche Informationen einspeisen oder legitime Daten während der Übertragung ändern [164], [165]. Beispielsweise könnte ein Angreifer Nachrichten fälschen, um Fahrzeuge über die Strassenverhältnisse irrezuführen, was zu Unfällen oder Verkehrsstaus führen würde. Zur Gewährleistung der Datenintegrität werden kryptografische Verfahren wie digitale Signaturen und Nachrichtenauthentifizierungscodes (MACs) eingesetzt, um sicherzustellen, dass die Daten nicht manipuliert wurden. Die Public-Key-Infrastruktur (PKI) wird häufig zur Verwaltung und Authentifizierung von Schlüsseln in V2X-Systemen verwendet.
- Denial-of-Service-Angriffe (DoS)*:* Bei einem DoS-Angriff überlastet ein Angreifer die V2X-Kommunikationskanäle oder bestimmte Netzwerkkomponenten, sodass sie für legitime Benutzer nicht mehr verfügbar sind [166], [167]. Dies könnte dazu führen, dass Fahrzeuge keine kritischen Sicherheitsinformationen mehr erhalten, was wiederum zu Unfällen oder erheblichen Verkehrsstörungen führen kann. Um sich gegen DoS-Angriffe zu schützen, benötigen V2X-Systeme robuste Netzwerkmanagement- und Eindringlingserkennungssysteme, die ungewöhnliche Verkehrsmuster erkennen und entschärfen können, die auf einen DoS-Angriff hindeuten. Redundanz in Kommunikationspfaden kann ebenfalls dazu beitragen, einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten.
- *Man-in-the-Middle (MitM)-Angriffe:* Bei einem MitM-Angriff fängt ein Angreifer die Kommunikation zwischen zwei V2X-Einheiten ab und verändert sie möglicherweise ohne deren Wissen [168], [169], [170]. Dadurch könnte der Angreifer die ausgetauschten Daten manipulieren, was zu falschen oder gefährlichen Handlungen der beteiligten Fahrzeuge führen könnte. MitM-Angriffe können durch die Implementierung einer End-to-End-Verschlüsselung abgewehrt werden, die sicherstellt, dass die Daten von der Quelle bis zum Ziel verschlüsselt sind, wodurch ein unbefugtes Abfangen verhindert wird. Die gegenseitige Authentifizierung zwischen den kommunizierenden Einheiten hilft auch bei der Überprüfung der Legitimität der Teilnehmer.
- *Malware und Software-Schwachstellen:* V2X-Systeme basieren auf komplexer Software, die Schwachstellen enthalten kann, die von Angreifern ausgenutzt werden können [171], [172]. Malware könnte in das System eines Fahrzeugs eingeschleust werden und es Angreifern ermöglichen, die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen oder seinen normalen Betrieb zu stören. Regelmässige Software-Updates und -Patches sind unerlässlich, um bekannte Schwachstellen zu beheben. Darüber hinaus sollten V2X-Systeme mit robusten Sicherheitsarchitekturen,

einschliesslich sicherer Boot-Mechanismen, konzipiert werden, um sicherzustellen, dass nur vertrauenswürdige Software auf kritischen Systemen ausgeführt wird.

- *Vertrauens- und Schlüsselverwaltung:* In einem V2X-Netzwerk ist die Vertrauensverwaltung von entscheidender Bedeutung, um sicherzustellen, dass nur legitime Fahrzeuge und Infrastrukturelemente an der Kommunikation teilnehmen können [173], [174]. Kompromittierte oder betrügerische Einheiten könnten ihren Zugang missbrauchen, um falsche Informationen zu verbreiten oder die Kommunikation zu stören. Eine gut implementierte PKI ist für die Verwaltung des Vertrauens innerhalb von V2X-Systemen unerlässlich. Sie stellt sicher, dass kryptografische Schlüssel auf sichere Weise verteilt, verwendet und widerrufen werden. Regelmässige Audits und Überwachungen sind ebenfalls erforderlich, um das Vertrauen aufrechtzuerhalten und kompromittierte Elemente schnell zu identifizieren.

2.8 Aktuelle Entwicklung und Testumgebung in EU-Ländern

Die Entwicklung und der Einsatz der Infrastruktur für autonome Fahrzeuge variieren in den europäischen Ländern erheblich, was auf Unterschiede in der Politik, bei Investitionen und beim technologischen Fortschritt zurückzuführen ist. In Europa gibt es viele Testumgebungen für AV, V2X und intelligente Verkehrssysteme (vgl. blaue Standorte in Abbildung 19).

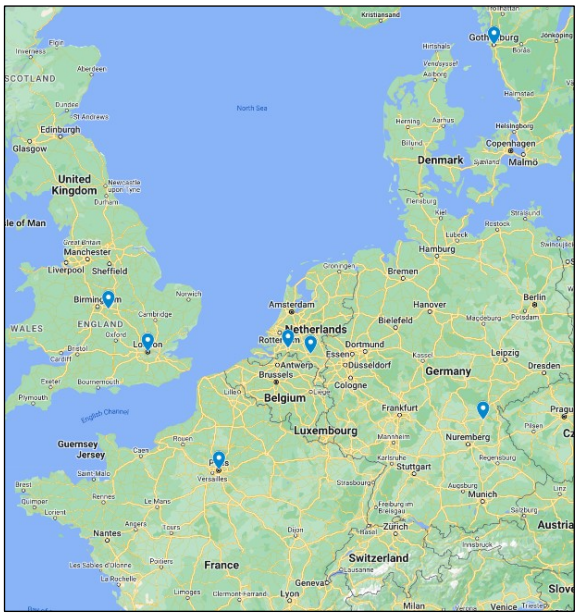

Abbildung 19: Teststandorte in EU Ländern: Übersicht [Google Maps]

Deutschland ist mit erheblichen Investitionen in Forschung und Infrastruktur führend in der Entwicklung autonomer Fahrzeuge. Das Land hat Testzonen für autonome Fahrzeuge eingerichtet, wie z. B. das Digital Motorway Test Bed auf der Autobahn A9 [132], [136], das mit DSRC- und C-V2X-Kommunikationstechnologien ausgestattet ist. Der deutsche Ansatz legt den Schwerpunkt auf robuste Sicherheitsstandards und die

Integration fortschrittlicher Sensoren, einschliesslich Radar, LiDAR und Kameras, sowie V2I-Technologien.
Das Vereinigte Königreich hat sich auf die Schaffung eines unterstützenden Rechtsrahmens und die Investition in Pilotprojekte für autonome Fahrzeuge konzentriert. Das Centre for Connected and Autonomous Vehicles (CCAV) [119] der britischen Regierung hat zahlreiche Versuche unterstützt, darunter städtische Testumgebungen in Städten wie London und Coventry. Die Infrastruktur umfasst umfassende V2X-Kommunikationssysteme und spezielle städtische Umgebungen für Tests. In diesen Systemen kommen sowohl DSRC als auch C-V2X zum Einsatz. Es werden Radare, LiDARs, Kameras und Induktionsschleifensensoren eingesetzt.
Frankreich hat verschiedene Pilotprojekte durchgeführt und in intelligente Strassenverkehrstechnologien investiert, insbesondere in städtischen Gebieten. Die französische Regierung unterstützt die Entwicklung autonomer Fahrzeuge durch Initiativen wie [120], [175], die autonome Mobilität in Städten testen. Frankreichs Infrastruktur legt den Schwerpunkt auf V2I-Kommunikation, einschliesslich DSRC und C-V2X, und Strassensensoren, einschliesslich Radar, LiDAR, Kameras, Induktionsschleifensensoren und akustische Sensoren, insbesondere in komplexen städtischen Umgebungen.
Die Niederlande sind für ihre proaktive Haltung in Bezug auf intelligente Mobilität und autonomes Fahren bekannt [176]. Die Niederlande konzentrieren sich auf integrierte V2X-Kommunikationssysteme, einschliesslich DSRC und C-V2X, und den umfassenden Einsatz von Strassensensoren, einschliesslich Radar, LiDAR und Kameras, um die Sicherheit und Effizienz sowohl auf Autobahnen als auch auf städtischen Strassen zu erhöhen [177].
Schwedens Ansatz in Bezug auf autonome Fahrzeuge ist durch die Zusammenarbeit zwischen Regierung, Industrie und Wissenschaft gekennzeichnet. Das Land hat mehrere Initiativen gestartet, wie z. B. das Projekt „Drive Me“ in Göteborg, bei dem autonome Fahrzeuge unter realen Verkehrsbedingungen getestet werden [178]. Die Infrastrukturentwicklung in Schweden umfasst fortschrittliche V2X-Kommunikationstechnologien und einen Schwerpunkt auf städtische und vorstädtische Strassenumgebungen.
In den Vereinigten Staaten wird die V2X-Kommunikation als eine entscheidende Technologie zur Verbesserung der Verkehrssicherheit, zur Optimierung des Verkehrsflusses und zur Ermöglichung autonomer Fahrzeuge anerkannt [179]. Die V2X-Entwicklung in den USA wurde durch eine Kombination aus Bundesinitiativen, Projekten auf Landesebene und Innovationen des Privatsektors vorangetrieben. Das US-Verkehrsministerium (USDOT) ist ein wichtiger Befürworter der V2X-Technologie, da es ihr Potenzial zur Reduzierung von Verkehrsunfällen und zur Verbesserung der allgemeinen Verkehrseffizienz erkannt hat. Das USDOT hat mehrere Pilotprogramme und Forschungsinitiativen durchgeführt, um die Machbarkeit und die Vorteile der V2X-Kommunikation zu untersuchen. Florida, Kalifornien und Texas sind weitere wichtige Bundesstaaten mit bedeutenden V2X-Einsätzen. Florida hat die V2X-Technologie in seiner SunTrax-Anlage implementiert, einem gross angelegten Testfeld für vernetzte und automatisierte Fahrzeuge. In Kalifornien werden in mehreren Projekten V2X-Technologien in städtischen Umgebungen erforscht, während Texas V2X in seine Verkehrsinfrastruktur in Städten wie Austin und Dallas integriert hat.
China ist führend bei der Entwicklung und Bereitstellung von V2X-Infrastrukturen, um das schnelle Wachstum autonomer Fahrzeuge zu unterstützen [30]. V2X wird als entscheidender Faktor für die Erreichung der ehrgeizigen Ziele des Landes in den

Bereichen autonomes Fahren und intelligente Verkehrssysteme angesehen. Chinas Ansatz kombiniert umfangreiche Infrastrukturinvestitionen, politische Unterstützung durch die Regierung und die aktive Beteiligung von Branchenführern und macht das Land zu einem der fortschrittlichsten Länder der Welt bei der Bereitstellung von V2X. Grossstädte wie Peking, Shanghai und Shenzhen sind führend bei der Bereitstellung der V2X-Infrastruktur. Diese Städte haben grossflächige Testzonen eingerichtet, in denen die V2X-Technologie in autonome Fahrzeuge integriert wird, um sie in der Praxis zu testen. Der von der chinesischen Regierung befürwortete C-V2X-Standard wird als nationaler Standard für die V2X-Kommunikation gefördert, was mit globalen Trends übereinstimmt und sicherstellt, dass die chinesische V2X-Technologie mit internationalen Systemen kompatibel ist.

2.9 Erkenntnisse aus Pilotprojekten zu V2I aus der Schweiz

Für die Auswertung wurde insbesondere die Projektliste der Swiss Association for Autonomous Mobility (SAAM) sowie die Projektdatenbank des ASTRA ausgewertet.
Im Moment der Analyse waren auf der SAAM-Website 28 abgeschlossene oder laufende Projekte aufgelistet. Das ASTRA wiederum publiziert sämtlich Zwischen und Abschlussberichte im Zusammenhang von Pilotprojekten mit automatisierten Fahren auf ihrer Website [180], und führt 15 abgeschlossene und 2 laufende Pilotprojekte auf (Stand Oktober 2024).
Schaut man sich die Art der Projekte an, fand der Start 2015 mit einem Personenwagen statt (Swisscom)[181], die Post experimentierte mit Lieferrobotern und diverse ÖV-Anbieter machten Projekte mit Shuttle- Bussen, einzelne Projekte drehen sich um Gepäckroboter oder Lieferfahrzeuge. Erst kürzlich wurden Projekte im Rahmen von intelligenter Mobilität gestartet (Swiss Transit Lab Schaffhausen [182], Loxo AG [183]).
Auffallend ist der Umstand, dass es aktuell noch keine wirklich hoch automatisierten Fahrzeuge gibt (ab Level 4), welche alleine unterwegs sind. Stets sind noch Menschen bereit einzugreifen, oder die Fahrzeuge werden von Teleoperatoren überwacht und im Bedarfsfall gesteuert. Weiter fällt auf, dass sich die Projekte auf städtische Bereiche und ausgewählte, freigegebene Strecken beschränken oder auf Firmengeländen stattfinden (Rayons). Bei den neueren Projekten geht es vor allem auch um Mobility on demand. Hierzu braucht es eine Anbindung mit Apps auf Mobiltelefonen, damit das Fahrzeug individuell abgerufen werden kann.
Beim Durchsehen der Projekte wurden keine spezifischen Pilotprojekte identifiziert, welche sich explizit mit Fragen der *Mindestanforderungen an die Infrastruktur* auseinandersetzen. Die verwendeten Fahrzeuge erkennen ihre Position meist mittels GPS und/oder Karten sowie LiDAR selbst und werden von Teleoperatoren überwacht.

2.10 Herausforderungen bei der Bereitstellung der

2.11 Infrastruktur in der Schweiz

Das Strassennetz der Schweiz zeichnet sich durch eine Mischung aus verschiedenen Kreuzungstypen, unterschiedlichen Grundrissen und variierenden geografischen

Merkmalen aus. Diese Vielfalt spiegelt die Mischung aus historischen Stadtzentren, bergigem Gelände und moderner Infrastruktur wider, die jeweils einzigartige Überlegungen für die Bereitstellung der V2X-Infrastruktur zur Unterstützung eines fortschrittlichen Verkehrsmanagements und autonomer Fahrzeuge mit sich bringen.
Vielfältige und komplexe Strassenstrukturen: Das Strassennetz der Schweiz umfasst ein breites Spektrum an Kreuzungstypen, wie T-Kreuzungen, Y-Kreuzungen, Kreisverkehre, schräge Kreuzungen und mehrarmige Kreuzungen. Für jede dieser Kreuzungen sind massgeschneiderte V2X-Lösungen erforderlich, um den Verkehr effektiv zu überwachen und zu steuern. Die Vielfalt der Kreuzungsdesigns bedeutet, dass ein einheitlicher Ansatz für die V2X-Einführung nicht möglich ist und massgeschneiderte Strategien für verschiedene Szenarien erforderlich sind. Viele Schweizer Städte haben sich über Jahrhunderte hinweg entwickelt, was zu unregelmässigen und nicht standardmässigen Strassenverläufen geführt hat. Diese historischen Stadtzentren weisen oft enge Strassen, scharfe Kurven und Kreuzungen auf, die nicht den modernen Rastermustern entsprechen. Die Bereitstellung einer V2X-Infrastruktur in solchen Gebieten erfordert eine sorgfältige Planung, um Sensoren und Kommunikationsgeräte zu integrieren, ohne den Verkehrsfluss zu stören oder den Charakter der städtischen Umgebung zu verändern.

- *Geografische und umweltbedingte Herausforderungen:* Die vielfältige Topografie der Schweiz mit ihren Bergen, Tälern und Ebenen macht die V2X-Einführung noch komplexer. Die unterschiedlichen Höhen und natürlichen Barrieren können die Signalausbreitung beeinträchtigen und den Einsatz spezieller Geräte erforderlich machen, um eine zuverlässige Kommunikation zu gewährleisten. In Bergregionen könnten beispielsweise zusätzliche RSUs erforderlich sein, um ein stabiles V2X-Netzwerk aufrechtzuerhalten. Darüber hinaus erhöht das Tunnelsystem, insbesondere in Bergregionen, die Komplexität der V2X-Bereitstellung. Tunnel stellen Kommunikationssysteme aufgrund von Signalstörungen und der Notwendigkeit einer kontinuierlichen Konnektivität auf engem Raum vor besondere Herausforderungen. Die Bereitstellung einer V2X-Infrastruktur in Tunneln erfordert spezielle Ausrüstung, um eine zuverlässige Kommunikation aufrechtzuerhalten und die Sicherheit innerhalb dieser kritischen Verkehrsverbindungen zu gewährleisten. Das Klima des Landes, das starken Schneefall, Nebel und Regen mit sich bringt, kann die Leistung von V2X-Sensoren und Kommunikationssystemen beeinträchtigen. Widrige Wetterbedingungen können die Genauigkeit bestimmter Sensoren, wie Kameras und LiDAR, beeinträchtigen und erfordern möglicherweise den Einsatz robusterer Alternativen wie Radar- oder Infrarotsensoren, die auch bei schlechten Sichtverhältnissen effektiv arbeiten können.
- *Städtische Dichte und infrastrukturelle Einschränkungen:* Die Städte der Schweiz sind dicht besiedelt und bieten nur wenig Platz für zusätzliche Infrastruktur. Die Installation von V2X-Komponenten wie RSUs und MEC-Knoten kann in diesen Umgebungen eine Herausforderung darstellen, da oft nur wenig Platz für Neuinstallationen vorhanden ist. Die Integration der V2X-Infrastruktur muss daher sorgfältig geplant werden, um vorhandene Strukturen wie Strassenlaternen, Verkehrsampeln und Gebäudefassaden zu nutzen. In städtischen Gebieten mit hohen Gebäuden und engen Strassen sind Signalstörungen und -behinderungen ein häufiges Problem. Die V2X-Kommunikation ist für eine optimale Leistung auf eine klare Sichtverbindung angewiesen, aber in dicht bebauten Stadtlandschaften

können Signale blockiert oder reflektiert werden, was zu potenziellen toten Winkeln oder einer geringeren Kommunikationszuverlässigkeit führt.

- *Infrastrukturintegration und Interoperabilität:* Kompatibilität mit bestehenden Systemen: Die Schweiz verfügt über eine gut ausgebaute Infrastruktur für das Verkehrsmanagement, aber die Integration der V2X-Technologie in dieses bestehende System erfordert die Sicherstellung der Kompatibilität mit Altsystemen. Dazu gehört die Aufrüstung älterer Infrastrukturen zur Unterstützung der V2X-Kommunikation und die Sicherstellung, dass neue Installationen bestehende Verkehrsleitsysteme nicht stören. Angesichts der zentralen Lage der Schweiz in Europa müssen V2X-Systeme nicht nur innerhalb des Landes, sondern auch mit den Nachbarländern interoperabel sein. Dies erfordert die Einhaltung internationaler Standards und die Sicherstellung, dass die Schweizer V2X-Infrastruktur effektiv mit Systemen in anderen Ländern kommunizieren kann, insbesondere in Grenzregionen, in denen grenzüberschreitender Verkehr üblich ist.
- *Regulatorische und sozioökonomische Überlegungen:* Der Einsatz von V2X-Infrastruktur in der Schweiz unterliegt strengen regulatorischen Rahmenbedingungen, die den Datenschutz, die Sicherheit und die Umweltauswirkungen regeln. Die Navigation durch diese Vorschriften, um V2X-Systeme einzusetzen, die sowohl effektiv als auch konform sind, ist eine grosse Herausforderung, die einen kontinuierlichen Dialog zwischen politischen Entscheidungsträgern, Branchenakteuren und Technologieanbietern erfordert. Die Komplexität des Schweizer Strassennetzes bedeutet, dass die Bereitstellung der V2X-Infrastruktur teurer sein kann als in weniger komplexen Umgebungen. Investitionen in die V2X-Technologie müssen durch eine klare Kosten-Nutzen-Analyse gerechtfertigt sein, die die langfristigen Einsparungen durch ein verbessertes Verkehrsmanagement, weniger Unfälle und eine höhere Effizienz berücksichtigt und mit den Vorabkosten für Installation und Wartung abgleicht.
- *Technische Herausforderungen:* Die Vernetzung von Fahrzeugen mit der Infrastruktur (V2I) durch Übermittlung von *Floating Car Data (FCD)* - wie Positions- und Bewegungsdaten von Fahrzeugen – ist aktuell noch mit einigen technischen Einschränkungen verbunden. Die Kombination aus zu geringer Datenabdeckung und hohen Latenzzeiten zwischen Fahrzeugerhebung und Datenverfügbarkeit ist aktuell noch nicht ausgereift.

3 Operational Design Domain für Infrastruktur

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden mögliche realistische Betriebsbedingungen ermittelt und kategorisiert, welche die für den Einsatz von bedingt- und hochautomatisierten Fahrzeugen auf öffentlichen Strassen innerhalb und ausserhalb des Siedlungsraums zentral sind.
Da es praktisch unzählige Kombinationen von Parametern gibt welche in einer nahezu unendlichen Anzahl ODD (Operational Design Domains) münden, erscheint es sinnvoll, einige der sich bereits in Anwendung befindlichen ODD zu bestimmen und herauszufinden unter welchen Umständen diese ODD nicht mehr anwendbar sind, respektive die Grenzen der Funktionalität der Sensorik zu beschreiben. Als Beispiel: Ausserstädtische OOD XYZ beinhaltet eine geteerte Strasse mit klarer gestrichelter Mittelmarkierung und durchgezogener Begrenzungslinie am Fahrbahnrand. Diese ODD XYZ würde ausserstädtisch, auf einer ungeteerten Landstrasse ohne Markierungslinien nicht mehr tauglich sein und eine Sensorik, welche mit der ODD XYZ einwandfrei funktioniert, wäre der ungeteerten Landstrasse nicht mehr gewachsen; es wäre mit Fehlfunktionen zu rechnen. Weiter ist damit zu rechnen, dass sich ODD kurzfristig ändern (Stausituation, Unfälle, Wetterwechsel etc.). Um diese Unsicherheiten auszugleichen, wird es wichtig werden, dass von Seiten der Infrastruktur den Fahrzeugen Unterstützung gewährt wird und Informationslücken möglichst gefüllt werden[63],[184].

Vorgehen

In einem ersten Schritt wurde die ISO Norm 34503 auf einer Sokrates Karte vereinfacht dargestellt und die darin enthaltenen ODD Elemente und ihre Ausprägungen aufgelistet. Die von den Fahrzeugherstellern verwendeten Elemente wurden in blauer Farbe markiert. In einem zweiten Schritt wurden die Strassenkategorien definiert und in einem dritten Schritt die ODD-Elemente tabellarisch zusammengefasst und den Strassenkategorien zugeteilt, um für die verschiedenen Strassenklassen typische ODD-Attribute zu bestimmen.

3.1 Sokrates Karte in Anlehnung an ISO 34503

ISO 34503:2023 ist ein internationaler Standard, der Anforderungen an die Operational Design Domain (ODD) eines automatisierten Fahrsystems (ADS) festlegt. Die ODD beschreibt die Bedingungen, unter denen ein ADS entworfen wurde, um zu funktionieren. Der Standard ist hauptsächlich für ADS der Stufen 3 und 4 relevant. Der Standard spezifiziert eine hierarchische Taxonomie zur Beschreibung von Betriebsbedingungen, die für die Definition der ODD verwendet wird. Die vorliegende Sokrates-Karte (Abbildung 20) fast die Elemente der ISO 34503 graphisch zusammen. Blau markiert sind ODD Kriterien, welche in den drei analysierten Fz Handbüchern verwendet wurden.

Copy of ISO 34503, Klassifizierung ISO TC 22 2023

DRIVE PILOT Maybach (p508 - 515)

Verantwortlich: Reto Schneider
Datum: 15.11.2024 00:00:00
Letzte Änderung: 10.09.2025 00:00:00
Revision: 15.11.2024 00:00:00

© THE SOKRATES MAP CONCEPT

Automated Driving Systems (ADS) sollen die Sicherheit verbessern, die Stauzeiten verringern, Emissionen reduzieren und mehr Menschen mobil machen. ODD =Arbeitsbedingungen für das ADS, um den Dynamic Driving Task (DDT) erfüllen zu können; sind betestbar.

in Handbuch verwendete Kriterien

Wirkungspakete: WP1, WP2, WP3, WP4, Stadt

ODD / TOD Definitionen		ODD beschreibt Bedinungen in den ADV sicher funktionieren	TOD beschreibt reale Bedingungen in denen ADV funktioniern muss	TOD ist eine Untergruppe von ODD	ODD ist eine Spezifikation für ADS	TOD gibt vor, unter welchen Bed. ADS sicher funkt. müssen	ODD muss bestestbar sein	Szenarien sind Testbedingungen			
	Szenarien	Wahrnehmungskontrolle	Verkehrskontrolle	Fahrzeugkontrolle	Szenen Ereignisse	Umweltbedingungen	Dynamische Elemente	Auslöser/Trigger	Dynamische Wechsel	Szenarien können innerhalb oder ausserh. der ODD sein	
		Dynamisches Element (ADV/Fahrzeug)	Umweltbedingungen	MRM min. Risiko-manöver,um MRC (min.risk cond) zu err.	Szenenelement unbeweg. Element z.B. Lichtmast, Signalanlage	Verletzlicher Strassenbenutzer	Verkehrsnutzer (traffic agent)	TOD Target Operationonal Domanin	COD Current Oper. Domain gegenwärtige Bedingungen	OD Operational Domain Set von Bedingungen für ADV Funktion	
Szenen Elemente	Zonen	fixierte Zone (Parkhaus, Schule, Schutzgebiet, ...)	Dynamische Zone, Strassenunterhalt, Baustelle	Interferenz Zone (Blätter, Drähte, Fahrleitung, Schlucht	Hafenzone	Logistik Verteilzentrum	Regionen	Länder	Geo fenced Zonen		
Befahrbare Bereiche	Bereichstypen	Autobahnen, Hochleistungsstrassen	Landstrassen, ein / doppelspurig	Radialstrasse	Verteilstrasse	kleine, lokale Strasse	Abzweiger (slip road)	Parkplatz	gemeinsamer Raum diverser Verkehrsteilnehmer		
		mit aktivem Verkehrsmanagement	ohne aktivem Verkehrsmanagement	Tempolimiten							
	Geometrie	horizontal, Gerade, Kurve	transversal/quer; geteilt ungeteilt, Kanten, Linien , Bankette	longitudinal/längs; Steigung, Gefälle, ebener Verlauf							
	Fahrspurbeschaffenheit Lane spec's	Dimensionen	Markierung, Farbe Zustand, einfach, dopp. durchgezogen, unterbr.	Reiserichtung, Rechtsverkehr, Linksverkehr	Tempolimite	Benutzung der Linien	Busspur	Auto Motorräder	Fahrradstreifen	Tramspur	
		Pannenstreifen	Notfallspur								
	Schilder	regulierende Schilder (rot gelb grün)	Warnschilder	Informationsschilder	fest monierte Schilder	variabel montierte Schilder	immer gültig	temporär gültig	Sprache oder Piktogram		
	äussere Ränder des Fahrstreifens Kanten	Linien	Schulter: geteert, Kies, Gras, Erde, ...	Schneemade	Leitplanke, Mauer, Steine	temporäre Markierung (rote Hüte)	keine Markierung				
Fahrbahn Oberfläche	Oberflächentypus	Asphalt	Beton, Zement	Pflasterstein (pavers)	Granitplatten	Kies					
	Zustand	Risse Spalten	Spurrinnen	Bombierung	Bremsschwellen	Rüttelmarkierungen					
	mögliche Fahrbedingungen	Vereist	nass	überschwemmt, stehendes Wasser	verschmutzt, verschlammt	Kontaminiert, Oel					
Kreuzungen, Ansschlussstelle	Kreisel	mini, <28 m ICD (inscribed circle diameter)	kompakt,zentr. Insel, 28-36 m	normal, zentr. Insel 28-100 m	gross, zentrale Insel, ICD >100m, mehrere Spuren und Ein/Ausfahr	Doppelt, 2 Kreisel mit kurzem Verbind. Stück	mehrfach, Kreiselkomplex auf mehrern Kreiseln	mit Gegenverkehr	ohne Gegenverkehr		
	Kreuzung	T-Kreuzung	Y-Kreuzung	Querstrasse, mit oder ohne Vortritt ev. Rechtsvortritt	gestaffelt	Grad getrennt	mit Signalen	ohne Signale			
	Strukturen am Strassenrand, im Fahrbahnbereich	Gebäude	Strassenbeleuchtung	Strassenausstattung, Poller	Bepflanzung						
	Spezielle Strukturen	Zufahrt mit Barriere	Brücke	Fussgänger Passage, Unter/Überführung	Zugunterführung	Tunnel	Zahlstation	Länge, Weite, Höhe, Schulterbreite	Kunstbauten hoch, Kunstbauten tief		
	temporäre Strukturen	Baustellenumleitung	Abfallsammlung	Strassenarbeiten	Markierungsarbeiten	Grünstreifenpflege					
Umweltbedingungen		Wetter	Atmosphärische Bedingungen	Antennensignalstärke/ Connectivity	Partikel	Beleuchtung					
Wetter; Elemente mit dem grössten Effekt Temperturangabe	Wind; m/s 2-10 min und oder Böen	kein Wind	ruhig; <0.2 m/s	leichter Luftzug; 0.3 m/s - 1.5 m/s	leichter Wind; 1.6 m/s -3.3 m/s	sanfter Wind; 5.5 m/s - 7.9 m/s	mässiger Wind; 8.0 m/s - 10.7 m/s	starker Wind; 10.8 m/s - 13.8 m/s	Nähe Tiefdruckzone; 13.9 m/s - 17.1 m/s	Tiefdruckzone; 17.2 m/s - 20.7 m/s	starke Tiefdruckzone; 20.8 m/s - 24.4 m/s
		Sturm; 24.5 m/s - 28.4 m/s	starker Sturm; 28.5 m/s - 32.6 m/s	Hurricane, Orkan; >32.7 m/s							
	Regen; mm/h	Intensität, Dauer in Min.	Radar Pixel in vorgeg. Abstand	Tröpfchengrösse	Regenschauer bei Frontdurchgang	Regenschauer bei Gewitter	Regenschauer im Staubreich von Gebirgen (orographisch)	kein Regen	leichter Regen <2.5 mm/h	mässiger Regen; 2.5 mm/h -7.6 mm/h	starker Regen; 7.6 mm/h - 50 mm/h
		heftiger Regen; 50 mm/h - 100 mm/h	Wolkenbruch; >100 mm/h								
	Schnee	kein Schnee	leichter Schneefall, Sicht mehr als 1 km	mässiger Schneefall; Sicht 0.5 km - 1 km	schwerer Schneefall; Sicht < 0.5 km						
	Partikel/Nebel; Intensität, Partikelgrösse	Sand	Staub	Asche	Rauch	Verschmutzung	Wasserdampf/Nebel	umhergewirbelte Teile (Blätter, Äste, Papier etc)			
	Beleuchtung, sichtbar, nicht sichtbar, Schatten, Blendungen	Tageslicht >2000 lx, Sonne von vorn, hi, lks oder rechts	Nacht, lx <1lx	Dämmerung Licht zwischen 1 lx und 2000 lx	Kunstlicht; Strassenl.,Fzlicht, Tunnel, Parkhaus	Wolken klarer Himmel, 0-1 Oktas	teilweise bewölkt, einzelne Wolken 1-2 Oktas	teilweise bewölkt, aufgelockerte Bewölkung 3-4 Oktas	teilweise bewölkt, durchbrochene Wolken 5-7 Oktas	bedeckz 8 Oktas	Position der Sonnen in Grad über dem Horizont
	Alternative Grössen	Temperatur	Luftfeuchtigkeit	Luftdruck	Belagstemperatur	Hagel	Überfrierender Regen, Blitzeis	Sonnenwind			
	Connectivity, Empfangen und oder Senden von Daten	Kommunikation	Typus; Flottenmgtm, Verkehrsmgtm, V2X	Technology cellular 2G, 3G, 4G, 5G	Satellitenverbindung	WLAN	DRSC	Intelligent Trsp System ITS.5G)	Side Link PC5 ...	Downlink, Throughput, latency	Uplink, Throughput, latency
		Positionierung	GPS	GLONASS	Galileo	RTK	BeiDou	Nav IC	QZSS	IRNSS	
		RTK Korrektur (real time kinematik, 2 cm genau	landesspezifisch	ortsabhängig	weltweit	Signalstärke	Interferenz; Roadside emitters, EMF				
Dynamische Elemente	Traffic Agents	Ambulanz Fz	Polizei Fz	Arbeits Fz	Verkehrsleitung Fz	Feuerwehr Fz	Motorfz	nicht Motorfz	Fussgänger	Velofahrer	e-scooters
		skateboarder	e-Trotinett	2- Räder generell	Reiter	Tiere	Dichte der Agents	Verkehrsvolumen	Flow Rate		
	Subject Vehicles	Max Geschwindigkeit	Geplanter Einsatzbereich (Gelände, Strassentyp)	Zuladung, Gewicht	Betrieb in Rayon						
ODD modes		permissive	restrictive	default							
Operational Design Conditions		Faher Beifahrer Status (Aufmerksamkeit, KindersAngeschnallt etc	Fahrzeug Status, alle Sensoren ok, vs. Teilausfall	gewählte ODD	Resultat: Entscheid ob ADS aktiviert werden kann						
Zusätzliche Elemente	Stadt	Tempo 60, 50, 30 oder 20 innerorts	Gegenverkehr	Randstein, variable Markierungen	Tramschienen Busspuren	Mofa, Velo, Fussgänger	Rechtsvortritt	Vortrittsregelung	Kreisel		
	Land	80	kurvig, wenig Kreuzungen	Kantonsstrassen blaue Schilder	Gegenverkehr	Mofa, Velo, Fussgänger	weniger Beschriftung,	Fahrbahnbegrezung, Markierung variabel	Rechtsvortritt	Vortrittsregelung	Kreisel
	Hochleistungsstrassen	Autobahnen, grün signalsiert	richtungsgetrennt	keine Mofas, Velos, Fussgänger	klare Begrenzung/Beschriftung, Linien, Markierung						
Swisstopo		Autobahn, Autostrassen grün	1, Klasse Strassen blau signalisierte Hauptstrassen	2. Klasse Strassen weiss signalisierte Nebenstrassen	Quartierstrassen	3. Klasse Strassen nicht zwingend mit strassenbelag LKW ok	4. Klasse Strassen mind 1.8 m breit Naturstrassen	5. Klasse Strassen Feld- und Waldweg Velowege			

Abbildung 20: Spezifikationen für Operational Design Domain für ADS; Blau markiert sind ODD Kriterien, welche in den drei analysierten Fz Handbüchern verwendet wurden (nach ISO 34503, Klassifizierung ISO TC 22 2023)

3.1.1 Zusammenfassung der Strassenkategorien

Abbildung 21 fasst die Strassenkategorien auf Basis der Landestopographie zusammen.

Klassifizierung	**Hochleistung**	**Land**			**Stadt/Innerorts**			
Beschreibung	Richtungsgetrennte Strassen mit hoher Geschwindigkeit	Überlandstrassen mit mittler - hoher Geschwindigkeit, nicht richtungsgetrennt			Langsamverkehr innerorts oder ländlich			
Klasse nach swisstopo	**Autobahn, richtungsgetrennt**	**Autostrasse, nicht richtungsgetrennt**	**1. Klasse-Strasse**	**2. Klasse-Strasse**	**Quartierstrasse**	**3. Klasse-Strasse**	**4. Klasse-Fahrweg**	**5. Klasse-Weg, Feld-, Wald- oder Veloweg**
Definition swisstopo	Eine kreuzungsfreie Strasse für den Schnellverkehr mit Mittelstreifen, auf welcher der Langsamverkehr nicht gestattet ist. Sie ist mit dem grünen Autobahnsymbol gekennzeichnet.	Eine kreuzungsfreie Strasse für den Schnellverkehr mit zwei oder mehr Fahrbahnen *ohne* Mittelstreifen, auf welcher der Langsamverkehr nicht gestattet ist. Sie ist mit dem grünen Autostrassensymbol gekennzeichnet.	Strassen 1. Klasse sind meistens blau signalisierte Hauptstrassen. Sie sind mindestens sechs Meter breit, so dass zwei Lastwagen sich ungehindert kreuzen können, und für den gemischten Verkehr (Velos, Traktoren) gestattet. Sie weisen Hartbelag auf und Steigungen sind nicht höher als 10 %. Diese Strassen haben oft einen Velostreifen und Trottoirs. Sie dienen vorwiegend dem Durchgangsverkehr.	Strassen 2. Klasse sind meistens weiss signalisierte Nebenstrassen. Sie sind mindestens vier Meter breit, so dass zwei Autos sich ungehindert kreuzen können. Sie weisen Hartbelag auf und Steigungen sind nicht höher als 15 %. Sie sind Ortsverbindungsstrassen oder wichtige Strassen innerorts. Zur Erhöhung der Sicherheit solcher Strassen können sie als Kernfahrbahn gestaltet werden.	Quartierstrassen sind ebenfalls mindestens vier Meter breit und mit Hartbelag versehen. Sie können verkehrsberuhigt sein und sind ohne Bedeutung für den Durchgangsverkehr. Ausserorts dienen Strassen dieser Klasse der Zufahrt zu wichtigen Anlagen oder Objekten.	Strassen 3. Klasse sind mindestens 2,80 Meter breit. Sie haben nicht zwingend einen Hartbelag. Gewöhnlich sind sie mit Lastwagen befahrbar, gekreuzt wird an Ausweichstellen. Diese Strassen dienen der Erschliessung von Siedlungen oder wichtigen Einzelgebäuden sowie der Land- und Forstwirtschaft.	Fahrwege 4. Klasse sind mindestens 1,80 Meter breit. Diese Naturstrassen können in der Mitte Grasbewuchs aufweisen. Bei normalen Verhältnissen sind sie mit Personenwagen befahrbar. Sie können mit einem Fahrverbot belegt sein.	Wege der 5. Klasse sind Feld- und Waldwege ohne ausreichenden Unterbau und oft nur mit Geländefahrzeugen oder Traktoren befahrbar. Velowege wiederum können mit Hartbelag ausgestattet sein. Sie sind oft parallel zu höherklassierten Strassen geführt, aber getrennt angelegt.
	Nationalstrasse							
	1. Klasse	**2. Klasse**	**3. Klasse**					
	Kantonstrasse							
			Gemeindestrasse					

Abbildung 21: Zusammenfassung der Strassenkategorien auf Basis Landestopographie

3.1.2 Spezifische ODD für Hochleistungsstrassen, Landstrassen und städtische Strassen

Wie im Forschungsantrag formuliert, wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes für die Klassen: Hochleistungsstrassen, Landstrassen, städtische Strassen, spezifische ODD erstellt. Die Definitionen der obigen Klassen basieren auf den in Abbildung 21 gezeigten Strassenkategorien. Hierzu wurden die ISO Standard 34503 (Abbildung 20) und die ODD-Elemente (Tabelle 5) analysiert.

Übersicht aller ODD (ISO34503)

ID	Bezeichnung	Stadt/Innerorts	Land	Hochleistung
S	**Szenen Elemente**			
S1	*Zonen*			
S1.1	fixierte Zone (Parkhaus, Schule, Schutzgebiet, ...)	✓		
S1.2	Dynamische Zone, Strassenunterhalt, Baustelle	✓	✓	✓
S1.3	Interferenz Zone (Blätter, Drähte, Fahrleitung, Schlucht)	✓	✓	✓
S1.4	Hafenzone	✓		
S1.5	Logistik Verteilzentrum	✓		
S1.6	Regionen	✓	✓	✓
S1.7	Länder	✓	✓	✓

ID	Bezeichnung	Stadt/Innerorts	Land	Hochleistung
S1.8	Geo fenced Zonen	✓	✓	✓
B	**Befahrbare Bereiche**			
B1	*Bereichstypen*			
B1.1	Autobahnen, Hochleistungsstrassen		✓	✓
B1.2	Landstrassen, ein- / doppelspurig		✓	
B1.3	Radialstrasse	✓		
B1.4	Verteilstrasse	✓		
B1.5	kleine, lokale Strasse	✓		
B1.6	Abzweiger/Ausfahrt (slip road)		✓	✓
B1.7	Parkplatz	✓		
B1.8	gemeinsamer Raum diverser Verkehrsteilnehmer	✓	✓	
B1.9	mit aktivem Verkehrsmanagement	✓	✓	✓
B1.10	ohne aktivem Verkehrsmanagement	✓	✓	✓
B1.11	Tempolimits	✓	✓	✓
B2	*2 - Geometrie*			
B2.1	horizontal; Gerade, Kurve	✓	✓	✓
B2.2	transversal/quer; geteilt, ungeteilt, Kanten, Linien, Bankette	✓	✓	✓
B2.3	longitudinal/längs; Steigung, Gefälle, ebener Verlauf	✓	✓	✓
B3	*3 - Fahrspurbeschaffenheit, Lane spec's*			
B3.1	Dimensionen	✓	✓	✓
B3.2	Markierung, Farbe, Zustand, einfach, dopp. durchgezogen, unterbr.	✓	✓	✓
B3.3	Reiserichtung, Rechtsverkehr, Linksverkehr	✓	✓	✓
B3.4	Tempolimits	✓	✓	✓
B3.5	Benutzung der Fahrspur	✓	✓	✓
B3.6	Busspur	✓	✓	
B3.7	Auto Motorräder	✓	✓	✓
B3.8	Fahrradstreifen	✓	✓	
B3.9	Tramspur	✓		
B3.10	Pannenstreifen		✓	✓
B3.11	Notfallspur		✓	✓
B4	*4 - Schilder*			
B4.1	regulierende Schilder (rot, gelb, grün)	✓	✓	✓
B4.2	Warnschilder	✓	✓	✓
B4.3	Informationsschilder	✓	✓	✓
B4.4	fest monierte Schilder	✓	✓	✓
B4.5	variabel montierte Schilder	✓	✓	✓
B4.6	immer gültig	✓	✓	✓

ID	Bezeichnung	Stadt/Innerorts	Land	Hochleistung
B4.7	temporär gültig	✓	✓	✓
B4.8	Sprache oder Piktogramm	✓	✓	✓
B5	*5 - Äussere Ränder des Fahrstreifens Kanten*			
B5.1	Linien	✓	✓	✓
B5.2	Schulter/Fahrbahnrand: geteert, Kies, Gras, Erde, ...	✓	✓	✓
B5.3	Schneemade	✓	✓	✓
B5.4	Leitplanke, Mauer, Steine	✓	✓	✓
B5.5	temporäre Markierung (rote Hüte)	✓	✓	✓
B5.6	keine Markierung	✓	✓	
F	**Fahrbahn, Oberfläche**			
F1	*1 - Oberflächentypus*			
F1.1	Asphalt	✓	✓	✓
F1.2	Beton, Zement	✓	✓	✓
F1.3	Pflasterstein (pavers)	✓	✓	
F1.4	Granitplatten	✓		
F1.5	Kies	✓		
F2	*2 - Zustand*			
F2.1	Risse, Spalten	✓	✓	✓
F2.2	Spurrinnen	✓	✓	✓
F2.3	Bombierung	✓		
F2.4	Bremsschwellen	✓		
F2.5	Rüttelmarkierungen	✓	✓	✓
F3	*3 - mögliche Fahrbedingungen*			
F3.1	vereist	✓	✓	✓
F3.2	nass	✓	✓	✓
F3.3	überschwemmt, stehendes Wasser	✓	✓	✓
F3.4	verschmutzt, verschlammt	✓	✓	✓
F3.5	kontaminiert, Oel	✓	✓	✓
F4	*4 - Kreisel*			
F4.1	mini, <28 m ICD (inscribed circle diameter)	✓	✓	
F4.2	kompakt, zentr. Insel, 28-36 m	✓	✓	
F4.3	normal, zentr. Insel 28- 100 m	✓	✓	
F4.4	gross, zentrale Insel, ICD >100m, mehrere Spuren und Ein/Ausfahrt	✓	✓	
F4.5	Doppelt, 2 Kreisel mit kurzem Verbind. Stück	✓	✓	
F4.6	mehrfach, Kreiselkomplex auf mehreren Kreiseln	✓	✓	
F4.7	mit Gegenverkehr	✓	✓	
F4.8	ohne Gegenverkehr	✓	✓	
F5	*5 - Kreuzung*			

ID	Bezeichnung	Stadt/Innerorts	Land	Hochleistung
F5.1	T-Kreuzung	✓	✓	
F5.2	Y-Kreuzung	✓	✓	
F5.3	Querstrasse, mit oder ohne Vortritt, ev. Rechtsvortritt	✓	✓	
F5.4	gestaffelt	✓	✓	
F5.5	Grad getrennt	✓	✓	
F5.6	mit Signalen	✓	✓	
F5.7	ohne Signale	✓	✓	
F6	*6 - Strukturen am Strassenrand, im Fahrbahnbereich*			
F6.1	Gebäude	✓	✓	
F6.2	Strassenbeleuchtung	✓	✓	✓
F6.3	Strassenausstattung, Poller	✓	✓	
F6.4	Bepflanzung	✓	✓	✓
F7	*7 - Spezielle Strukturen*			
F7.1	Zufahrt mit Barriere	✓	✓	✓
F7.2	Brücke	✓	✓	✓
F7.3	Fussgänger Passage, Unter-/Überführung	✓	✓	✓
F7.4	Zugunterführung	✓	✓	✓
F7.5	Tunnel	✓	✓	✓
F7.6	Zahlstation		✓	✓
F7.7	Länge, Weite, Höhe, Schulterbreite	✓	✓	✓
F7.8	Kunstbauten hoch, Kunstbauten tief	✓	✓	✓
F8	*8 - temporäre Strukturen*			
F8.1	Baustellenumleitung	✓	✓	✓
F8.2	Abfallsammlung	✓	✓	✓
F8.3	Strassenarbeiten	✓	✓	✓
F8.4	Markierungsarbeiten	✓	✓	✓
F8.5	Grünstreifenpflege	✓	✓	✓
U	**U - Umweltbedingungen**			
U1	Wetter	✓	✓	✓
U2	Atmosphärische Bedingungen	✓	✓	✓
U3	Antennensignalstärke/Connectivity	✓	✓	✓
U4	Partikel	✓	✓	✓
U5	Beleuchtung	✓	✓	✓
W	**W - Wetter; Elemente mit dem grössten Effekt (Temperaturangabe)**			
W1	*1 - Wind; m/s 2-10 min und oder Böen*			
W1.1	kein Wind	✓	✓	✓
W1.2	ruhig; <0.2 m/s	✓	✓	✓
W1.3	leichter Luftzug; 0.3 m/s - 1.5 m/s	✓	✓	✓

ID	Bezeichnung	Stadt/Innerorts	Land	Hochleistung
W1.4	leichter Wind; 1.6 m/s - 3.3 m/s	✓	✓	✓
W1.5	sanfter Wind; 5.5 m/s -7.9 m/s	✓	✓	✓
W1.6	mässiger Wind; 8.0 m/s -10.7 m/s	✓	✓	✓
W1.7	starker Wind; 10.8 m/s -13.8 m/s	✓	✓	✓
W1.8	Nähe Tiefdruckzone; 13.9 m/s - 17.1 m/s	✓	✓	✓
W1.9	Tiefdruckzone; 17.2 m/s- 20.7 m/s	✓	✓	✓
W1.10	starke Tiefdruckzone;20.8 m/s - 24.4 m/s	✓	✓	✓
W1.11	Sturm; 24.5 m/s - 28.4m/s	✓	✓	✓
W1.12	starker Sturm; 28.5 m/s - 32.6 m/s	✓	✓	✓
W1.13	Hurricane, Orkan; >32.7 m/s	✓	✓	✓
W2	*2 - Regen*			
W2.1	Intensität, Dauer in Min.	✓	✓	✓
W2.2	Radar Pixel in vorgeg. Abstand	✓	✓	✓
W2.3	Tröpfchengrösse	✓	✓	✓
W2.4	Regenschauer bei Frontdurchgang	✓	✓	✓
W2.5	Regenschauer bei Gewitter	✓	✓	✓
W2.6	Regenschauer im Staubereich von Gebirgen (orthographisch)	✓	✓	✓
W2.7	kein Regen	✓	✓	✓
W2.8	leichter Regen; <2.5 mm/h	✓	✓	✓
W2.9	mässiger Regen; 2.5mm/h - 7.6 mm/h	✓	✓	✓
W2.10	starker Regen; 7.6mm/h - 50 mm/h	✓	✓	✓
W2.11	heftiger Regen; 50 mm/h - 100 mm/h	✓	✓	✓
W2.12	Wolkenbruch; >100 mm/h	✓	✓	✓
W3	*3 - Schnee*			
W3.1	kein Schnee	✓	✓	✓
W3.2	leichter Schneefall; Sicht mehr als 1 km	✓	✓	✓
W3.3	mässiger Schneefall; Sicht 0.5 km - 1 km	✓	✓	✓
W3.4	schwerer Schneefall; Sicht < 0.5 km	✓	✓	✓
W4	*4 - Partikel/Nebel; Intensität, Partikelgrösse*			
W4.1	Sand	✓	✓	✓
W4.2	Staub	✓	✓	✓
W4.3	Asche	✓	✓	✓
W4.4	Rauch	✓	✓	✓
W4.5	Verschmutzung	✓	✓	✓
W4.6	Wasserdampf/Nebel	✓	✓	✓
W4.7	umhergewirbelte Teile (Blätter, Äste, Papier etc)	✓	✓	✓
W5	*5 - Beleuchtung, sichtbar, nicht sichtbar, Schatten, Blendungen*			
W5.1	Tageslicht >2000 lx, Sonne von vorn, hinten, links oder rechts	✓	✓	✓

ID	Bezeichnung	Stadt/Innerorts	Land	Hochleistung
W5.2	Nacht, lx <1lx	✓	✓	✓
W5.3	Dämmerung Lichtzwischen 1 lx und 2000 lx	✓	✓	✓
W5.4	Kunstlicht, Strassenl., Fz-Licht, Tunnel, Parkhaus	✓	✓	✓
W5.5	Wolken klarer Himmel, 0-1 Oktas	✓	✓	✓
W5.6	teilweise bewölkt, einzelne Wolken, 1-2 Oktas	✓	✓	✓
W5.7	teilweise bewölkt, aufgelockerte Bewölkung, 3-4 Oktas	✓	✓	✓
W5.8	teilweise bewölkt, durchbrochene Wolken, 5-7 Oktas	✓	✓	✓
W5.9	bedeckt, 8 Oktas	✓	✓	✓
W5.10	Position der Sonne in Grad über dem Horizont	✓	✓	✓
W6	*6 - Alternative Grössen*			
W6.1	Temperatur	✓	✓	✓
W6.2	Luftfeuchtigkeit	✓	✓	✓
W6.3	Luftdruck	✓	✓	✓
W6.4	Belagstemperatur	✓	✓	✓
W6.5	Hagel	✓	✓	✓
W6.6	Überfrierender Regen, Blitzeis	✓	✓	✓
W6.7	Sonnenwind	✓	✓	✓
W7	*7 - Connectivity, Empfangen und/oder Senden von Daten*			
W7.1	Kommunikation	✓	✓	✓
W7.2	Typus; Flottenmgmt., Verkehrsmgmt., V2X	✓	✓	✓
W7.3	Technology cellular 2G, 3G, 4G, 5G	✓	✓	✓
W7.4	Satellitenverbindung	✓	✓	✓
W7.5	WLAN	✓	✓	✓
W7.6	DRSC	✓	✓	✓
W7.7	Intelligent Trsp System ITS.5G	✓	✓	✓
W7.8	Side Link PC5 ...	✓	✓	✓
W7.9	Downlink, Throughput, Latency	✓	✓	✓
W7.10	Uplink, Throughput, Latency	✓	✓	✓
W7.11	Positionierung	✓	✓	✓
W7.12	GPS	✓	✓	✓
W7.13	GLONASS	✓	✓	✓
W7.14	Galileo	✓	✓	✓
W7.15	RTK	✓	✓	✓
W7.16	BeiDou	✓	✓	✓
W7.17	Nav IC	✓	✓	✓
W7.18	QZSS	✓	✓	✓
W7.19	IRNSS	✓	✓	✓

ID	Bezeichnung	Stadt/Innerorts	Land	Hochleistung
W7.20	RTK Korrektur (real time kinematik, 2 cm genau)	✓	✓	✓
W7.21	landesspezifisch	✓	✓	✓
W7.22	ortsabhängig	✓	✓	✓
W7.23	weltweit	✓	✓	✓
W7.24	Signalstärke	✓	✓	✓
W7.25	Interferenz; Roadsideemitters, EMF	✓	✓	✓
D	**D - Dynamische Elemente**			
D1	*1 - Traffic Agents*			
D1.1	Ambulanz Fz	✓	✓	✓
D1.2	Polizei Fz	✓	✓	✓
D1.3	Arbeits Fz	✓	✓	✓
D1.4	Verkehrsleitung Fz	✓	✓	✓
D1.5	Feuerwehr Fz	✓	✓	✓
D1.6	Motorfz	✓	✓	✓
D1.7	nicht Motorfz	✓	✓	
D1.8	Fussgänger	✓	✓	
D1.9	Velofahrer	✓	✓	
D1.10	e-Scooter	✓	✓	✓
D1.11	Skateboarder	✓		
D1.12	e-Trotinett	✓		
D1.13	2-Räder generell	✓	✓	✓
D1.14	Reiter	✓		
D1.15	Tiere	✓	✓	✓
D1.16	Dichte der Agents	✓	✓	✓
D1.17	Verkehrsvolumen	✓	✓	✓
D1.18	Flow Rate	✓	✓	✓
D2	*2 - Subject Vehicles*			
D2.1	Max Geschwindigkeit	✓	✓	✓
D2.2	Geplanter Einsatzbereich (Gelände, Strassentyp)	✓	✓	✓
D2.3	Zuladung, Gewicht	✓	✓	✓
D2.4	Betrieb in Rayon	✓	✓	✓
OM	**OM - ODD modes**			
OM1	permissive	✓	✓	✓
OM2	restrictive	✓	✓	✓
OM3	default	✓	✓	✓
ODD	**ODD - Operational Design Conditions**			
ODD1	Fahrer/Beifahrer Status (Aufmerksamkeit, Kinder angeschnallt etc.)	✓	✓	✓
ODD2	Fahrzeug Status, alle Sensoren ok, vs. Teilausfall	✓	✓	✓

ID	Bezeichnung	Stadt/Innerorts	Land	Hochleistung
ODD3	gewählte ODD	✓	✓	✓
ODD4	Resultat: Entscheid ob ADS aktiviert werden kann	✓	✓	✓

Tabelle 5: Alle ODD Kriterien auf Basis der Norm ISO34503, mit einer Zuteilung der Relevanz für die 3 Kategorien Stadt/Innerorts, Land und Hochleistungsstrassen

Die Zuordnung der einzelnen Attribute zu den 3 Strassenklassen ergab keine wirklich unterschiedlichen Profile. Daraus ergab sich folgende Schlussfolgerung:
Offensichtlich ist es nicht zielführend für die Hochleistungsstrassen, Landstrassen und städtische Bereiche spezifische ODD vorzuschlagen.
Die 3 Klassen von Verkehrswegen stellen jedoch unterschiedliche Anforderungen an die Sensorik der automatisierten Fahrzeuge. Vereinfacht kann man feststellen, dass es vermutlich technisch am einfachsten ist auf der Autobahn, ohne Gegenverkehr, mit gut sichtbaren Fahrbahngrenzen, Signalisation und Tempolimits, automatisiert zu fahren. Das städtische Umfeld scheint komplexer zu sein, kann aber als Langsamverkehr verstanden werden. Hier kommen vor allem Vortrittsregeln, Mischverkehr, Abzweigungen, Kreuzungen, Zweiräder und Fussgänger als Herausforderung für die Sensorik hinzu. Aus Gesprächen mit Fachleuten wurde darauf hingewiesen, dass die Landstrasse als die *schwierigste Klasse* bewertet wird, da die Fahrzeuggeschwindigkeiten relativ hoch, die Strassen kurvig und mit grossen Steigungen, Gefällen sein können und die Fahrbahnmarkierungen insbesondere an den Rändern unter Umständen fehlen oder schlecht erkennbar sind. Ebenfalls muss mit sehr grossem bis zu sehr kleinem Verkehrsaufkommen gerechnet werden. In gewissen Fällen ist ein Fahrzeug alleine unterwegs, so dass ein vorausfahrendes Referenzfahrzeug fehlt. Zusätzlich werden Landstrassen von allen Verkehrsteilnehmern genutzt, was eine grosse Herausforderung für die Sensorik darstellt. Ein bis heute nicht gelöstes Problem stellen dynamische, plötzliche Veränderung der Strassenführung durch Baustellen, Unfälle, wachsende Pflanzen etc. dar.

3.2 Mobilitätsszenarien

3.2.1 Szenario I: Maximale Vernetzung von Fahrzeugen mit der Verkehrsinfrastruktur

In dieser künftigen Welt gelingt es, Vorteile der intelligenten Mobilität maximal zu nutzen. Die Verkehrsinfrastruktur liefert in Echtzeit Verkehrsdaten, verarbeitet Daten von Fahrzeugen, und sämtlichen anderen Verkehrsteilnehmern und optimiert den Verkehrsfluss und lenkt die Mobilitätsströme**.** Neue Geschäftsmodelle eröffnen sich, man gibt sich maximal technikoffen und ermöglicht die kurzfristige Realisierung innovativer Pilotprojekte unter Berücksichtigung von Sicherheit, Effizienz und Bezahlbarkeit. Die Kenngrössen von Szenario I - der Maximalen Vernetzung von Fahrzeugen mit der Verkehrsinfrastruktur – sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Kenngrössen von Szenario I	
Zukunftsbild	Vollständig vernetzte, intelligente Mobilitätswelt.
Kernidee	Fahrzeuge, Infrastruktur und alle Verkehrsteilnehmer tauschen in Echtzeit Daten aus.
Ziele	Optimierter Verkehrsfluss, Effizienzsteigerung, höhere Sicherheit, neue Geschäftsmodelle.
Technologiepolitik	Technikoffenheit, Förderung von Piloten, schnelle Innovationszyklen.
Nutzen	Intelligente Verkehrssteuerung, adaptive Systeme, integrierte Mobilität, hohe Systemeffizienz.
Herausforderungen	Datenschutz, Standardisierung, Investitionen, Interoperabilität.

Tabelle 6: Kenngrössen von Szenario I - Maximale Vernetzung von Fahrzeugen mit der Verkehrsinfrastruktur

3.2.2 Szenario II: Beschränkte minimale Vernetzung von Fahrzeugen innerhalb der gleichen Marke

Autohersteller haben wenig Interesse die Kommunikation von Fahrzeugen verschiedener Marken zu ermöglichen. Weiter gehen sie davon aus, dass die Fahrzeuge mit allen Verkehrsbedingungen *zurechtkommen* müssen. Staumeldungen, Unfallmeldungen, Strassenzustand etc. werden nur innerhalb der Marke ausgetauscht. Die Fahrzeuge senden keine oder nur eingeschränkt Daten an die Verkehrsinfrastruktur und schliessen externe Beeinflussung praktisch aus. Die Entwicklung erfolgt iterativ; technologische Neuigkeiten werden im Premiumsegment ausgerollt und allmählich in der Modellpalette integriert. Die Chancen der intelligenten Mobilität werden nur teilweise genutzt, die Entwicklung verläuft eher langsam. Die Kenngrössen von Szenario II - Beschränkte minimale Vernetzung von Fahrzeugen innerhalb der gleichen Marke – sind in Tabelle 7 zusammengefasst

Kenngrössen von Szenario II	
Zukunftsbild	Fragmentierte, markenzentrierte Vernetzung
Kernidee	Kommunikation erfolgt nur zwischen Fahrzeugen derselben Marke, keine Verbindung zur Infrastruktur
Ziele	Markenexklusivität, iterative Entwicklung, Kontrolle über Innovationsgeschwindigkeit
Technologiepolitik	Zögerliche Adaption, Premium-orientiert, geschlossene Systeme
Nutzen	Selektive Sicherheit und Komfortverbesserung innerhalb von Markenökosystemen
Herausforderungen	Geringe Effizienzgewinne, verpasste Chancen durch fehlende Integration, langsamere Marktdurchdringung.

Tabelle 7: Kenngrössen von Szenario II - Beschränkte minimale Vernetzung von Fahrzeugen innerhalb der gleichen Marke

3.2.3 Vergleich und Prognose der Szenarienentwicklung

In Verbindung mit der Definition der ISAD-Stufen (Tabelle 8) und auf Basis der Kriterien der Szenarien I und II erfolgt im Folgenden der Vergleich und es werden denkbare Entwicklungen und eine mögliche Prognose aufgezeigt (Tabelle 9 und Abbildung 22)

ISAD Stufen

ISAD-Stufe	Infrastrukturunterstützung für automatisiertes Fahren
E	Keine Unterstützung durch die Infrastruktur
D	Statische Informationen (z. B. Kartendaten, Beschilderung)
C	Dynamische Informationen (z. B. Baustellen, Verkehrslage)
B	Interaktion: Infrastruktur reagiert auf Verkehr (z. B. V2I-Kommunikation)
A	Vollständige Koordination & Kooperationsfähigkeit zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (z. B. kooperative Verkehrssteuerung, Echtzeitsteuerung)

Tabelle 8: Definition der ISAD-Stufen [63]

Vergleich und Prognose

Aspekt	**Szenario I**	**Szenario II**
Vernetzungsgrad	Hoch (alle Akteure, Infrastruktur, Fahrzeuge)	Gering (nur innerhalb einer Marke)
Datenfluss	Offen, bidirektional mit Infrastruktur	Begrenzter, interner Datenfluss
Innovationsgeschwindigkeit	Hoch, durch technikoffene Pilotversuche	Langsam, inkrementell, erst im Premiumsegment
Verkehrsfluss & Sicherheit	Optimiert durch Echtzeitsteuerung	Teilweise verbessert, abhängig von Fahrzeugfunktionen
Systemoffenheit	Offen, interoperabel	Geschlossen, proprietär
Nutzen	Umfassend, systemübergreifend	Selektiv, markenabhängig
Neue Geschäftsmodelle	Vielfältig möglich (z. B. datenbasierte Dienste)	Eingeschränkt auf Herstellerökosystem
Gesamtgesellschaftlicher Nutzen	Hoch	Mittel bis gering
ISAD-Stufen	**Entwicklung und Prognose**	
-notwendig	A (höchste Stufe)	D, max. C
-Übergangsphase	C → B → A	E → D → C
Kurzfristig (2025–2030)	Ausbau ISAD C (dynamische Infos: Baustellen, Wetter, Ampelphasen online).	ISAD D fast flächendeckend, C in stark frequentierten Gebieten.
Mittelfristig (2030–2035)	Einführung von ISAD B (V2I-Kommunikation an Knotenpunkten, LSA-Anbindung)	punktuelle ISAD C (z. B. Stau- und Baustellenwarnungen, Verkehrslagedaten)
Langfristig (ab 2035)	Vollausbau auf ISAD A in urbanen Zonen, ausgewählten Autobahnabschnitten und Testregionen.	ISAD B oder A sind für dieses Szenario nicht erforderlich und werden ggf. ignoriert.

Tabelle 9: Vergleich und Entwicklungsprognose Szenario I und Szenario II

Abbildung 22 veranschaulicht die mögliche Entwicklung des autonomen Verkehrs in Abhängigkeit der Komplexität technischer Entwicklungen und Kriterien und gibt eine qualitative Einordnung der Szenarien I und II.

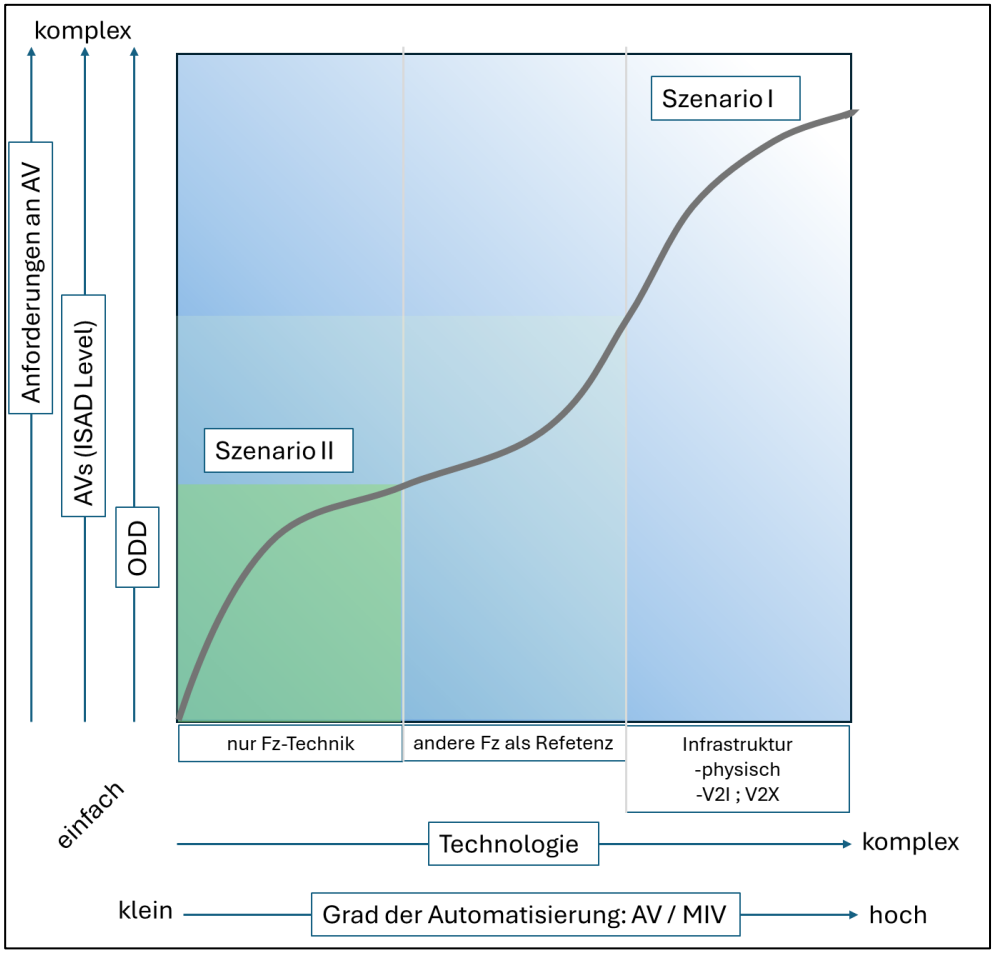

Abbildung 22: AV - Kenngrössen und Szenarien

Auf Basis dieser Überlegungen können folgende Schlüsse insbesondere im Hinblick auf die Infrastrukturunterstützung gezogen werden:

- Szenario I braucht ISAD A als Rückgrat. Ohne die Infrastrukturunterstützung bleiben die Effizienz- und Sicherheitsvorteile weitgehend unrealisiert.
- Szenario II funktioniert schon mit ISAD D/C, nutzt jedoch das volle Potenzial vernetzter Mobilität nicht aus. Diese Strategie verlangsamt Innovation und fragmentiert den Verkehrsfluss (vgl. Abbildung 24).
- Zeitlich ist ISAD A in großem Stil frühestens ab 2035 realistisch – zunächst in Pilotregionen, dann in verkehrsrelevanten Korridoren.
- Ein Fahrzeug kann theoretisch ein bestimmtes SAE-Level (z. B. SAE 4) erreichen. Ob es dieses Level praktisch sicher umsetzen kann, hängt aber von der Unterstützung durch die Infrastruktur (ISAD-Level) ab. Das IS-Д (Delta) bezeichnet die „Lücke“ zwischen dem fahrzeugseitig möglichen Automatisierungsgrad und dem tatsächlich nutzbaren Automatisierungsgrad in der gegebenen Infrastruktur (siehe Abbildung 23).

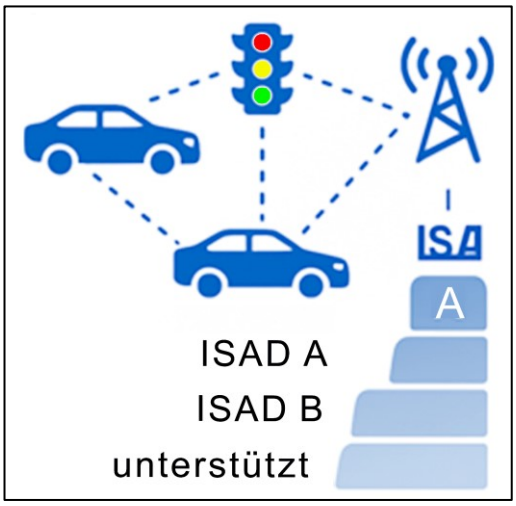

Abbildung 23: Szenario I – maximale Vernetzung V2I

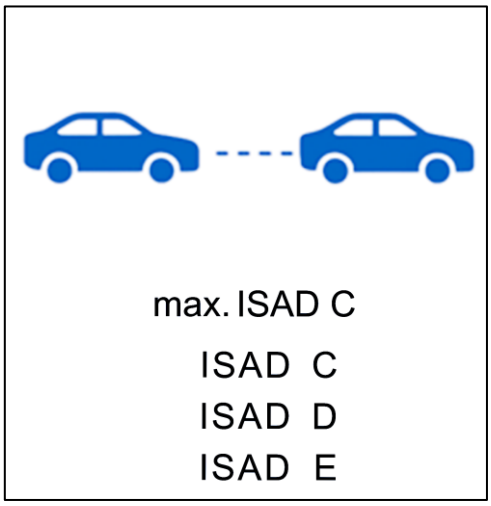

Abbildung 24: Szenario II – minimale Vernetzung V2I

3.2.4 ODD Management

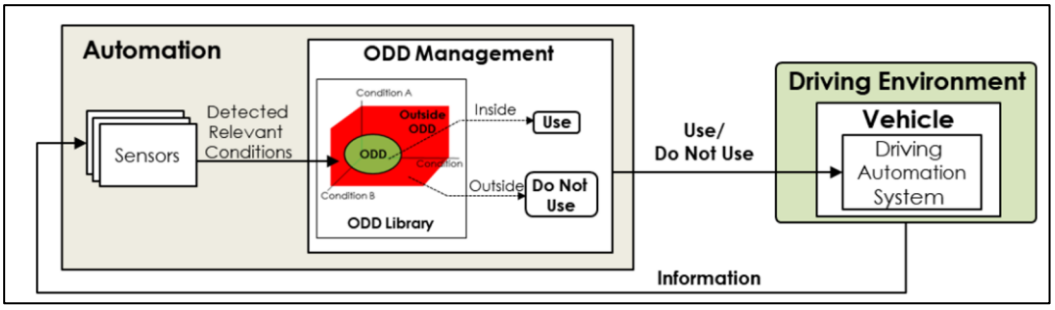

Abbildung 25: Schema ODD Management[185]

Wie Abbildung 25 zeigt, bestimmen Leistungsparameter der Fahrzeugsensoren, ob sich das Fahrzeug innerhalb oder ausserhalb einer vordefinierten ODD befindet. Die ursprüngliche Frage: «Wo braucht es Unterstützung durch die Infrastruktur (physisch, digital) bzw. was sind die Anforderungen der Sensorik an die Infrastruktur?» wurde durch diese Feststellung obsolet. Basierend auf der Erkenntnis, dass die Sensorleistung der bestimmende Faktor ist, wurden die Handbücher von 3 europäischen Autoherstellern analysiert. In der Abbildung 20 wurden die verwendeten Attribute in blau eingefärbt. Dabei wurde festgestellt, dass mehrheitlich Negativ-Listen zur Anwendung kommen. Diese beschreiben hauptsächlich Umweltbedingungen, unter welchen die diversen Assistenzsysteme nicht, oder nicht präzise funktionieren und der Fahrer ohne diese Assistenzsysteme auskommen und die Fahrverantwortung übernehmen muss. Vermutlich hat dieses Vorgehen haftungsrechtliche Gründe, um die Hersteller vor Klagen zu schützen. Die Frage unter welchen Umweltbedingungen spezifische Sensoren gut, mittel, oder schlecht funktionieren erübrigt sich ebenfalls, weil die reale Fahrsituation ein korrektes Funktionieren des Sensors bedingt. Ist keine optimale Funktion möglich, wird die ODD verlassen und der Fahrer muss die Kontrolle übernehmen, weil das Assistenzsystem nicht mehr korrekt funktionieren kann.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in den untersuchten Fahrzeug-Handbüchern (Maybach, BMW, Volkswagen) vorwiegend Ausschlusskriterien, respektive Systemgrenzen als Schutz vor Haftungsschäden aufgeführt sind.
Die OEM in den Betriebshandbüchern mit wenigen Elementen engbeschränkte ODD (zum Beispiel: Trockene Fahrbahn, bei Tageslicht, bis maximal 60 km/h) beschreiben. Mehrheitlich werden Bedingungen beschrieben, unter denen die Fahrassistenten nicht verwendet werden können (Beispiel: Kurven, Tunnels, Steigungen, Schnee, Sonnenuntergang, rechts überholen etc.)
Zum heutigen Zeitpunkt sind die ADS nur in engen Grenzen nutzbar. Hierzu sei eine Anmerkung zu den Ansprüchen an die Fahrzeugtechnik erlaubt: Wenn der Fahrer-in im Nebel oder im Schneetreiben nichts mehr sieht, muss er verlangsamen oder anhalten, um einen sicheren Stopp zu erreichen. Dass gleiche sollte auch für das automatisierte Fahren gelten dürfen und man darf nicht erwarten, dass automatisierte Fahrzeuge mit ihrer Sensorik die menschlichen Sinne weit übertreffen werden, denn im Nebel sehen auch Videokameras nichts mehr.

4 Kommunikation V2X

Um Kommunikationsprotokolle zu entwickeln, braucht es die Kooperation der verschiedenen Stakeholder miteinander. Eine Einzel-/Eigenentwicklung erscheint nicht zielführend zu sein. Zur Erhöhung der Sicherheit sind Informationen von Seiten der Infrastruktur notwendig (Blick um die Ecke, Stauwarnung etc.).
Eine V2V Kommunikation erscheint momentan unrealistisch; die Kommunikation wird momentan nur innerhalb der Marken ermöglicht und nicht markenübergreifend. V2I erscheint hingegen machbar. Am einfachsten ist es Umweltinformationen über «broadcasting» an alle Verkehrsteilnehmer zu verteilen.
Computing im Auto ist nicht kosteneffizient, woraus sich schliessen lässt, dass die Infrastruktur das Computing übernehmen muss. Offen bleibt die Frage, von wo aus, welche Daten ausgewertet werden sollen? Offenbar besteht auf Seiten der Infrastrukturbetreiber keine Absicht RSU aufzustellen und zu betreiben.
Der Aufbau eines kooperativen, intelligenten Verkehrssystems ist weniger eine Frage der (Kommunikations-) Technologie als der Kooperation unter Berücksichtigung aller wesentlichen, komplexen Zusammenhänge (vgl. Abbildung 26). Standardisierte Schnittstellen, transparente Kommunikation und das Überwinden wirtschaftlicher Eigeninteressen sind die zentralen Hebel für den Erfolg. Es braucht nicht zwangsläufig große zentrale Infrastrukturen – aber einen verbindlichen politischen Willen und den Mut, neue Wege zu gehen.

4.1 Infrastruktur und Kommunikation

Eine vollständig zentrale Infrastruktur ist nicht zwingend notwendig, um kooperativen Verkehr zu ermöglichen. Vielmehr liegt das Potenzial in dezentralen Ansätzen, etwa in der Kommunikation zwischen Fahrzeugen (C2C – Car-to-Car) oder zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (C2X). Allerdings zeigt sich hier ein zentrales Problem: Viele OEM weigern sich, ihre Systeme zu öffnen oder standardisierte On-Board-Units (OBU) flächendeckend zu verbauen. Auch staatliche Institutionen wie das ASTRA haben nicht die regulatorische Durchsetzungskraft, um verbindliche Vorgaben durchzusetzen.

4.2 Datenintegrität

Datenintegrität ist ein weiterer wichtiger Aspekt: Wie zuverlässig sind Lichtsignalanlagen, wenn man von verschiedenen «Units» auf diese zugreifen können soll. Wie anfällig für Malware Attacken sind die notwendigen Geräte (vgl. Kap. 2.7.3)

4.3 Hochauflösende Karten und Echtzeitinformationen

Hochauflösende Karten galten lange als Schlüssel zur Automatisierung, haben jedoch an Bedeutung verloren. Ihr größtes Manko ist die mangelnde Aktualisierbarkeit: Baustellen, Unfälle oder kurzfristige Verkehrsänderungen können nicht in Echtzeit

eingepflegt werden. Für viele Anwendungsfälle sind sie daher unbrauchbar. Die sich permanent verändernde Umwelt (Blätter, Pflanzenwuchs, Baustellen, plötzlich auftretende Hindernisse, Murgänge etc.) kann auf Karten nicht in real time abgebildet werden. Um sich ein aktuelles Bild der Lage und dem Umfeld zu verschaffen, wird die Sensor Fusion angewendet. Dabei wird ein Bild von der Umgebung (Video- oder LiDAR-Kameras) mit der gespeicherten Karte abgeglichen: Karten, welche nur auf LiDAR Daten basieren, haben Schwierigkeiten das zurückgeworfene Bild von z.B. wachsenden Bäumen zu verarbeiten.

Kommunikation V2X Schweiz

Workshop 17.09.2024

Verantwortlich:
Datum: 11.09.2024 00:00:00
Letzte Änderung: 17.09.2024 00:00:00
Revision: 11.09.2024 00:00:00

© THE SOKRATES MAP CONCEPT

Beschreibung der minimalen Anforderungen an die Infrastruktur, um einen sicheren und effizienten Betrieb von Autonomen Fahrzeugen zu ermöglichen

- OK, stabil gut und positiver Trend
- Probleme, Trend unklar, Monitoring nötig
- Fahrzeug intern Sicherheit
- Gefährlich für das System, sofort eingreifen
- Infrastrukturseitig
- Noch nicht eingeschätzt, unklar
- Derzeit (noch) nicht relevant
- Idee, Vision, Projekt entwickeln

Wirkungspakete

- WP1
- WP2
- WP3
- WP4
- WP5

Werte Zielgrössen		Sicherheit	Effizienz Strasseninfrastruktur	Komfort-Themen	Bandbreite Information pro Zeiteinheit	Standards?	Konnektivität über Mobilfunktechnologie			
		Datenintegrität sichergestellt	Zeitnahe Signalübermittlung	Realtime Signalübermittlung	Redundanzen	gehärtet gegen Cyberattacken	möglichst standardardisiert	Cooperativer Verkehr ermöglicht	gute Konnektivität	Homogener Verkehrsfluss als oberstes Ziel
Chancen		weniger Kollisionen	grössere Kapazitäten bestehnder Strassen	besserer Verkehrsfluss	Steuerung von Lichtsignalen	Steuerungen von Strassenbeleuchtung	Freischalten von Fahrstrassen für Blaulichtfahrten	C-ITS	Werbung, Marketing, Konsum, Erlebnis, Entertainment	Aktivierung Automatisierung, Erleichter Mobilitätszug
		Schnittstelle zum Betreiber	Ladeinfrastrukturen	Logistikbetreiber	OeV Anbieter	Betreiber 2 Betreiber	OEM			
		Zugang für eingeschränkte Menschen ermöglichen	externe Systeme als Redundanz	Sicherheitsgewinn durch externe Systeme wenn on board versagt						
Sensoren für	**Wahrnehmung**	Distanzmessung	Geschwindigkeit	Tracking ?	Farben von Ampeln	Lesen von Strassenschildern	Fahrsicherheit/Fahrdynamik durch Glättewarnung			
	Fahrzeug Sensoren	Video	LIDAR	RADAR	Ultraschallsensoren					
	Roadside units RSU	Kameras, Kamerasysteme	LIDAR	Radar	Schleifendetektoren	Dynamische Mobilfunkdaten	Bedingt open data gegenseitiger D austausch (ASTRA)			
Computer für	**Entscheidungsfindung**	MEC Mobile Edge Computing	Roadside Computing	Cloud Computing						
Kommunikationsgeräte	**Roadside units RSU**									
	Kommunkationsprotokolle	DSCR / Kurzstrecke WLAN	Zelluläres V2X Mobilfunk 4G, 5G, 6G	CAM: Corporate Awareness Message	DENM: Dezentralisierte Umweltbenachrichtigung	IVIM: Fahrzeuginterne Informationsmeldungen	SPATEM: Signalphasen und Zeitmeldung			
		V2P vehicle to pedestrian	V2I vehicle to infrastructure	V2N Vehicle to network	V2V Vehicle to vehicle	V2X vehicle to everything				
andere Verkehrsteilnehmer		Fussgänger	Mischverkehr	OeV	AV LI-V					
Überraschungen, veränderte Umweltbedingungen		Daten aus anderen Fahrzeugen	Meteodaten	Strassenzustandsdaten	Baustellen	Unfälle	Stau	Konnektivität könnte diese Ueberraschungen abfangen	Umnutzung Pannenstreifen	
Sicherheit, was braucht es?	**zwingend notwendig; erhöhend aber nicht notwendig; Komfort**									
Effizienz, was braucht es?	**zwingend notwendig; erhöhend aber nicht notwendig; Komfort**									
ISAD Ebenen	**was braucht es min / max. an Sensoren und Infrastruktur?**	E, keine AV Unterstützung	D Statische, digit. Unterst. Karten	C Dynamische Digit. Information	B Kooperative Wahrnehmung	A Cooperatives Fahren				
Risiken		Cyberattacken	DoS Attacken	MitM (man in the middle)	Malware	Schlüsselverwaltung				
Regelwerke	**Fokus Sicherheit**	UN ECE ein AV muss ohne Konnektivität auskommen	Beim stehenden Fz muss etwas geschehen	"alles muss im Auto vorhanden sein"	bei Cellular viel schwieriger zu attackieren	WiFi ist anfälliger	e-sim muss geschützt werden			
		Schweiz möchte Konnektität für automatisiertes Fahren	Autonomes Fahren als Begriff wird vermieden (ASTRA)	Komplexe Strassensituation	Mischverkehr	Ist man bereit die Daten untereinander auszutauschen?				
Nachrüstlösungen		Einspielungen von aktuellen Meldungen z.B über Radio, Apps ...								

SOKRATESGROUP.com

Abbildung 26: Zusammenhänge der Kommunikation V2X – Schweiz

4.4 GPS/GNSS: Fundament jeder Automatisierung

Ohne präzise Positionsbestimmung ist automatisiertes Fahren kaum denkbar. Schätzungen zufolge würden rund 80 % der aktuellen Anwendungen ohne GPS /GNSS vollständig versagen. Eine verlässliche und hochgenaue Ortung ist damit eine Grundvoraussetzung.

4.5 Kommunikationstechnologien und Standardisierung

Internationale Protokolle wie C-ITS (ISO, IEEE, ETSI) sind zwar vorhanden und Use Cases sind definiert – doch in der Praxis scheitert es oft an der Umsetzung. Unterschiedliche Frequenzbänder (USA vs. Europa) verhindern eine nahtlose Interoperabilität. Aktuell sind es nur einzelne Fahrzeugmodelle (z. B. VW Golf 8, ID.Buzz), die über C2X-fähige on Board Units (OBUs) verfügen und mit Roadside Units (RSUs) kommunizieren können. Pilotversuche in Österreich mit ÖV-Integration und RSUs auf Lichtsignalanlagen (LSA) zeigen jedoch, dass das System grundsätzlich funktioniert.[186]

4.6 Roadside Units (RSU) und ihr Potenzial

RSUs an Lichtsignalanlagen (LSA) ermöglichen wichtige Zusatzfunktionen wie „virtuelle Spiegel“, die um die Ecke blicken können. Auch Anwendungen wie SPaTEM (Signal Phase and Timing Extended Message) zählen zu den erfolgversprechendsten Einsatzszenarien. In Deutschland existieren erste Teststrecken mit RSU von Hamburg bis Wien, die u. a. Baustellenwarnungen ermöglichen – sofern das Fahrzeug mit einer OBU ausgerüstet ist.
Die Zusatzkosten für RSUs an LSA sind überschaubar: Sie betragen lediglich etwa 1 % bis 2 % der Gesamtanlagekosten. Das ASTRA setzt derzeit auf eine zentrale Verkehrssteuerung via nationaler Verkehrsmanagementzentrale (VMZ). Der Erfolg dieser Strategie scheint jedoch von der Bereitschaft der OEM abzuhängen, ihre Schnittstellen zu öffnen und die notwendigen Fahrdaten zur Verfügung zu stellen.

4.7 Alternativen zur On Board Unit (OBU) und kommerzielle Interessen

Eine mögliche Alternative zur OBU wäre eine Smartphone-App, die Verkehrsdaten empfängt und verarbeitet. Anbieter wie Yunex oder SWARCO liefern bereits OBU-Hardware, ergänzt durch Visualisierungs-Tablets im Fahrzeug. Dennoch bleibt ein Problem bestehen: Der Zugang zum sogenannten CAN -Bus (Controller Area Network) der Hersteller – dem „heiligen Gral“ der Fahrzeuginformation – bleibt verschlossen.
Mobilfunkanbieter zeigen bislang offenbar wenig Interesse an „5G Slicing“, einer Technik, mit der Verkehrsanwendungen priorisiert übertragen werden könnten. Sollte sich das ändern, ist mit erheblichen Kosten für den Nutzer zu rechnen.

4.8 Rolle von KI und kommunaler Infrastruktur

Künstliche Intelligenz wird zunehmend eingesetzt, um Lichtsignalanlagen zu optimieren: von der Detektion über Bildverarbeitung bis zur akustischen Analyse (z. B. Erkennung von Martinshörnern). Da jede Stadt über einen eigenen Verkehrsrechner verfügt, könnte dieser als lokales Steuerzentrum fungieren – ein dezentraler, aber effizienter Ansatz.

4.9 Prüfung und Qualitätssicherung

Ein bemerkenswerter Gedanke aus dem Workshop betrifft die Qualitätssicherung automatisierter Systeme: Während menschliche Fahrer eine 45-minütige Fahrprüfung absolvieren, werden Assistenzsysteme und autonome Funktionen kaum vergleichbar getestet. Eine intensive technische Prüfung durch ExpertInnen könnte hier Abhilfe schaffen – zumindest in kritischen Anwendungsbereichen.

4.10 Herausforderungen bei der Interpretation von Sensordaten im autonomen Fahren

Wie bereits unter Kap. 2.3.1 beschrieben verfügen die zum Einsatz kommenden Sensoren über ihre spezifischen Eigenschaften (Tabelle 10).

Übersicht Sensoren

Sensortyp	Primäre Funktion	Datentyp	Typische Reichweite
Kamera	Objekterkennung, Szenenverständnis, Spurhaltung, Verkehrszeichenerkennung	Bilder, Videos (visuelle Daten)	Mittel bis Lang (bis mehrere hundert Meter)
LiDAR	Hochauflösende 3D-Kartierung, präzise Objekterkennung und -distanz	3D-Punktwolken	Mittel bis Lang (bis 200 Meter)
Radar	Objektdetektion und -verfolgung, Geschwindigkeits- und Distanzmessung	Radardaten (Geschwindigkeit, Distanz)	Mittel bis Lang (bis 250 Meter)
Ultraschall	Kurzstrecken-Hinderniserkennung, Distanzmessung	Schallwellen-Reflexionen	Kurz (weniger als 15 Meter)
GPS/IMU	Lokalisierung, Orientierung, Bewegungserfassung	Standortkoordinaten, Beschleunigung, Winkelgeschwindigkeit	Global (GPS), Lokal (IMU)

Tabelle 10: Übersicht Sensoren

Signale, die für Maschinen ausgelegt sind – etwa im Infrarotbereich – stoßen rasch an physikalische und praktische Grenzen. Viele Verkehrszeichen werden nicht zuverlässig erkannt, besonders bei Dunkelheit. Der Einsatz von Infrarot-Scheinwerfern wäre zwar theoretisch hilfreich, ist in der Praxis jedoch schwer realisierbar. Maschinenlesbare Signale allein werden daher nicht die Lösung sein.

Die reine Erfassung von Sensordaten reicht somit nicht aus – entscheidend ist deren korrekte, kontextuelle Interpretation. Die Herausforderungen bei der Interpretation von Sensordaten im autonomen Fahren werden im Folgenden zusammengefasst (vgl. Kap. 2.3):

- Wetterbedingungen wie Regen, Nebel oder Schnee beeinträchtigen die Leistung von Kameras und LiDAR erheblich.
- Extreme Lichtverhältnisse führen zu Bildfehlern und erhöhen das Unfallrisiko autonomer Fahrzeuge deutlich.
- Hindernisse mit täuschender Textur oder geringer Sichtbarkeit stellen große Herausforderungen für die Objekterkennung dar.
- Verkehrszeichen und Fahrbahnmarkierungen können unklar sein oder durch Beschädigungen, Verschmutzungen, Überlagerungen oder regionale Unterschiede schwer erkennbar sein. Komplexe Verkehrsszenarien wie widersprüchliche Signale oder menschliche Gesten erfordern kontextuelles Verständnis.
- Menschliche Intuition, wie das Deuten von Gesten oder nonverbalen Hinweisen, ist für AVs schwer nachzubilden.
- Seltene Ereignisse („Edge Cases“ oder Sonderfälle) überfordern oft die auf Trainingsdaten basierenden Algorithmen.

Für zuverlässiges autonomes Fahren müssen KI-Systeme nicht nur erkennen, sondern auch verstehen, interpretieren und mit Unsicherheiten umgehen können.

5 Mindestanforderungen an die Infrastruktur

Als vorübergehendes Fazit, im Rahmen dieses Forschungsprojektes, blieben die Fragen nach den zwingend notwendigen Anforderungen an die Infrastruktur, um die Sicherheit und Effizienz der Autonomen Fahrzeuge zu erhöhen, weitgehend unbeantwortet. Dieses Ergebnis lässt sich mit der Tatsache begründen, dass die autonomen Fahrzeuge jederzeit selbstständig jede Umweltbedingung erfassen müssen, um entsprechend reagieren zu können. Wie in Kapitel 2.3 diskutiert, können Sensoren nur innerhalb einer eng definierten ODD funktionieren. Verlässt das AV diese definierte ODD, muss der Fahrer die Steuerung übernehmen. Mit Hilfe zusätzlicher Informationsquellen wie zum Beispiel in ISAD A angeboten, wird es für automatisierte Fahrzeuge möglich sein, über längere Zeit- und Wegstrecken innerhalb einer für die jeweilige Fahrfunktion des Fahrzeugs „beherrschbaren“ Operational Design Domain (ODD) unterwegs zu sein. Auf diese Weise käme es seltener zur Übergabe von Fahraufgaben zwischen dem Fahrsystem und einem Menschen. Diese Aussagen beziehen sich im Besonderen auf die Level 3 und 4.

In den letzten Jahren sind in der Schweiz verschiedene Projekte lanciert worden, um die Machbarkeit des autonomen Fahrens zu untersuchen (vgl. Kap. 2.9). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die meisten Projekte auf die Machbarkeit und weniger auf die dazu notwendige Infrastruktur und oder die Bedürfnisse für eine vernetzte Kommunikation unter den verschiedenen Verkehrsteilnehmern fokussieren. Dabei wird die Machbarkeit vorwiegend auf der Basis heutiger Standards, der Akzeptanz von Geschäftsmodellen mit AV und deren Wirtschaftlichkeit sowie deren Beitrag zur Verkehrssicherheit und allenfalls der Nachhaltigkeit ermittelt.

Aus den Grenzen der Fahrzeugtechnik heraus scheinen keine expliziten Anforderungen an die Infrastruktur gestellt zu werden. Die Fahrzeuge folgen dem Prinzip des *Ego Cars*, d.h. sie müssen alle Fahraufgaben selbständig erledigen können. Eine Ausnahme gibt es: Autonome Fahrzeuge werden voraussichtlich immer auf ein funktionierendes GPS-Signal angewiesen sein, um ihren Standort genau bestimmen zu können.

Die Entwicklung eines 100% AV, das alle beliebigen Umgebungen (sämtliche relevanten ODD-Elemente) erfüllt und vollständig autonom (Level 5) funktioniert, ist aus heutiger Sicht fraglich oder zumindest in weiter Ferne oder scheint sich schlicht nicht zu rechnen. Die Nutzung zusätzlicher Kommunikationsverbindungen V2I, V2X ist jedoch vielversprechend, um die AV auf dem Weg in die höheren Level zu unterstützen.

Falls die Zukunft elektrisch sein sollte, werden sich die OEM bezüglich Motoren (Kraft und Drehmoment) kaum mehr unterscheiden. Die Differenzierung würde dann über die Reichweite, das Batteriemanagement und die Kommunikationsmöglichkeiten laufen. Aus diesem Grunde scheint es eher unrealistisch zu hoffen, dass die OEM ihren streng geschützten CAN-Bus freischalten, da dadurch die Differenzierungsmöglichkeit wegfallen würde. Im Gegenzug können die nationalen Regulatoren wohl kaum genügend Druck auf die Autobauer ausüben, um eine Freischaltung zu erreichen.

Der Nutzen ändert je nach Rolle und deren Blickwinkel auf die Systeme. Momentan stellen sich Fragen nach der Wirtschaftlichkeit und dem effektiven Sicherheitsgewinn.

Die dazu notwendige Konnektivität eröffnet neue Geschäftsfelder und ist für die einen ein Risiko für andere eine Chance.
Damit sich das autonome und vernetzte Fahren durchsetzen und weiterentwickeln kann, braucht es einen kooperativen Ansatz der verschiedenen Beteiligten (vgl. Abbildung 27).

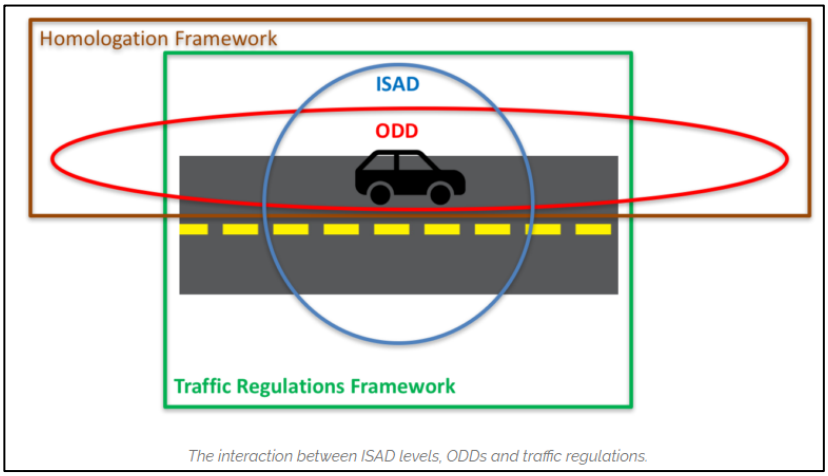

Abbildung 27: Zusammenspiel von ODD, ISAD Levels und Regulierung [187]

Die Fahrzeuge müssen sich einerseits in der vorgegebenen ODD bewegen können. Der Bewegungsumfang kann allenfalls mit Unterstützung einer digitalen Infrastruktur erweitert werden. Das Ganze funktioniert nur, falls sich die gelten nationalen und internationalen Regelungen digital übertragen lassen (Geschwindigkeitsbeschränkungen, Spureinschränkungen, Lichtsignalanlagen, etc.) und die autonomen Fahrzeuge über die entsprechenden Freigaben verfügen.
Es ist wünschenswert allfällige neue digitale Dienstleistungen nicht nur den AV sondern auch dem MV (Mischverkehr) zur Verfügung zu stellen. Damit würde die Sicherheit und Effizienz des gesamten Verkehrs verbessert.
Auf Basis der Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes lassen sich zusammenfassend die Anforderungen an die Infrastruktur formulieren und folgendermassen strukturieren:

- Sicherheit
- Technik
- Betrieb

5.1 Sicherheit

5.1.1 Maschinenlesbare Signalisation

Verkehrszeichen und Markierungen müssen in standardisierten Formaten (z.B. retroreflektierend) ausgeführt sein, die von AV-Sensoren zuverlässig erkannt werden

5.1.2 Redundante Systeme

Kritische Infrastrukturkomponenten (z.B. Kommunikationsknoten) müssen redundant ausgelegt sein, um Single Points of Failure zu vermeiden.

5.1.3 Barrierefreiheit

Physische Trennung von Verkehrsströmen in komplexen Umgebungen (z.B. Kreisverkehre)

5.2 Technik

5.2.1 V2X-Kommunikation

Flächendeckende Installation von Road Side Units (RSUs) mit 5G/C-V2X-Technologie, mindestens alle 500m auf Autobahnen und 1 km in urbanen Gebieten.

5.2.2 Sensorfusion

Infrastrukturseitige Sensorik (LiDAR, Kameras, Radar) zur Ergänzung der Fahrzeugsensoren, insbesondere in Wetterlagen mit eingeschränkter Sicht.

5.2.3 Edge Computing

Lokale Datenverarbeitung an Verkehrsknotenpunkten zur Reduzierung der Latenz bei kritischen Entscheidungen.

5.3 Betrieb

5.3.1 Echtzeit-Datenaktualisierung

Dynamische Anpassung von Geschwindigkeitslimits und Fahrspurinformationen basierend auf Verkehrslage und Wetter.

5.3.2 Wartungsprotokolle

Standardisierte Wartungsintervalle für Infrastruktursensoren (z.B. alle 6 Monate) und Kommunikationseinrichtungen (z.B. alle 3 Monate).

5.3.3 Interoperabilität

Offene Schnittstellen (APIs) zur Gewährleistung der Kompatibilität zwischen Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller.

5.4 Infrastrukturbezogene Entwicklung[1]

Die Anforderungen an die Infrastruktur werden sich wohl eher nach dem wahrgenommen und realen Zusatznutzen ausrichten und weniger an den Bedürfnissen von AV. Der Zusatznutzen von neuen Dienstleistungen (z.B. Fahrzeuge erfassen/zählen, Verkehrsbeeinflussung, Kapazitätssteigerungen, Kraftstoffeinsparungen, Frühwarnsysteme, Blaulichtbevorzugung/Priorisierung einzelner Rollen) ist schwierig zu quantifizieren und Vor- und Nachteile sind rollenabhängig, oder bleiben unklar.
Unbestritten scheint der Bedarf an Kommunikationsinfrastruktur zu sein. Hier sollte man aber unterscheiden, wer diese Infrastruktur hinstellt. Es dürften wohl eher Städte und private Firmen sein. Die Anforderungen an die Infrastrukturen vom ASTRA

[1] Die in diesem Kapitel angegebenen Zeit- und Jahresangaben sind grobe Schätzungen, die im Rahmen der Workshops diskutiert wurden.

dürften sich auf die dem ASTRA gehörenden Strassen beschränken und entstehen nicht allein aus den Zielen des autonomen Fahrens heraus.

5.4.1 Digitalisierung der physischen Infrastruktur

Anforderungen

- Hochpräzise digitale Karten mit Attributierung von Fahrbahn, Randbedingungen, Verkehrszeichen etc.
- Kontinuierliche Aktualisierung über Sensorik, Crowd-Sourcing, Behördenrückmeldungen.
- Sichtbare und maschinenlesbare Fahrbahnmarkierungen und Verkehrszeichen (auch bei Schnee, Regen, Nacht).

Ausblick

- Bis ca. 2030 flächendeckende digitale Grundausstattung für hochautomatisiertes Fahren (Level 3) in definierten Korridoren (z. B. Autobahnen, Smart Cities).

5.4.2 Kommunikationsinfrastruktur (V2X / ITS-G5 / C-V2X / 5G/6G)

Anforderungen

- Echtzeitfähige Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (V2I/I2V).
- Flächendeckende, latenzarme Mobilfunkverbindungen (5G/6G) oder dedizierte ITS-G5-Kommunikation.
- Hybridmodelle für Redundanz und Ausfallsicherheit.

Ausblick

- Bis 2035 in urbanen Räumen und Hochlastachsen verfügbar. Im ländlichen Raum wird passive Infrastruktur (ISAD D/C) dominieren.

5.4.3 Sensorik & Edge-Intelligenz in der Infrastruktur

Anforderungen

- Ampeln, Schilderbrücken, Parkhäuser, Tunnel mit LiDAR/Radar/Kamera ausgestattet.
- Sensorfusion zur Erkennung von Gefahrensituationen (z. B. Fußgänger, Geisterfahrer, Baustellen).
- Lokale Datenverarbeitung („Edge Computing“) zur schnellen Reaktion.

Ausblick

- Kritisch für ISAD B/A. Bis ca. 2040 in sicherheitskritischen Zonen (z. B. Kreuzungen, Schulen) Standard.

5.4.4 Zuverlässigkeit, Sicherheit & Cyberschutz

Anforderungen

- Absicherung gegen Cyberangriffe, Manipulation und Fehlfunktionen.
- Sichere OTA-Updates (Over-the-Air) für Infrastrukturkomponenten.
- Redundante Systeme zur Gewährleistung der Verkehrsflusskontrolle bei Ausfall einzelner Komponenten.

Ausblick

- Zunehmende Regulierung erwartet – analog zur Luftfahrt (Sicherheitszertifizierungen, Resilienztests).

5.4.5 Infrastruktur als Datenquelle & Verkehrsmanager

Anforderungen

- Infrastruktur wird zur aktiven Instanz: steuert Verkehrsströme, priorisiert Fahrzeuge, glättet Konflikte.
- Cloud- und KI-Unterstützung zur Mustererkennung, Vorhersage, Optimierung.

Ausblick

- Aufbau urbaner Verkehrsleitzentralen mit KI-gestützter Steuerung (Digital Twin Cities) ab 2030.

5.4.6 Planerische & rechtliche Integration

Anforderungen

- Neue Standards und Richtlinien (z. B. für ISAD-konformes Straßendesign).
- Klare Verantwortlichkeiten für Betrieb, Wartung und Finanzierung digitaler Infrastruktur.
- Integration in kommunale Verkehrs- und Stadtentwicklungsplanung.

Ausblick

- Tiefgreifende Modernisierung von Planungsprozessen in den nächsten 10–15 Jahren erforderlich.

5.4.7 Übergangsmanagement und Mixed-Traffic/Mischverkehr

Anforderungen

- Infrastruktur muss sowohl automatisierten als auch konventionellen Fahrzeugen gerecht werden.
- Flexible, adaptive Elemente (z. B. Ampelschaltungen, Spurführungen) zur Situationsanpassung.

Ausblick

- Dauerhafte Parallelität beider Systeme mindestens bis 2045 realistisch.

5.4.8 Infrastruktur wird zum „Mitfahrer" im Verkehrsfluss

Die Anforderungen an die Infrastruktur für autonomes Fahren reichen von physisch sichtbar (Markierungen, Sensoren) bis unsichtbar digital (Datenflüsse, Kommunikation, Koordination). Ohne eine intelligent unterstützende Infrastruktur bleibt autonomes Fahren entweder unsicher, ineffizient oder beschränkt auf geschlossene Testumgebungen.

Eine Roadmap für die Infrastrukturentwicklung zur Unterstützung autonomen Fahrens strukturiert sich sinnvoll entlang von drei Entwicklungsphasen bis ca. 2045. Jede Phase berücksichtigt den Fortschritt der Fahrzeugautomatisierung (SAE-Level), die ISAD-Ausbaustufen und politische/ökonomische Realitäten.

Tabelle 11 zeigt eine hypothetische, praxisnahe Roadmap in mit Fokus auf Deutschland oder vergleichbare europäische Länder:

Hypothetische Roadmap der Infrastruktur für Autonomes Fahren

Phase	Zeitraum	Zielbild	Schwerpunkte Infrastruktur	ISAD-Level	SAE-Level
1. Grundlagen schaffen	2025–2030	Flächendeckende Digitalisierung, vernetzte Pilotregionen	- Flächendeckende digitale Karten (statisch) - Ausbau 5G entlang Autobahnen - Pilotstrecken mit V2X-Tests	D → C (punktuell B)	SAE 2–3
2. Kooperative Systeme etablieren	2030–2035	Intelligente, kommunizierende Infrastruktur in urbanen Hotspots	- Infrastruktur mit Sensorik und Edge-Intelligenz (Kreuzungen, Lichtsignale) - Verkehrsmanagementzentralen	C → B in Ballungsräumen	SAE 3–4 (bedingt 5)
3. Skalierung & Standardisierung	2035–2045	Kooperatives autonomes Fahren auf ausgewählten Strecken im Mischbetrieb	- Vollausbau ISAD A auf Autobahnen, Smart Cities - Kooperative Lichtsignalsteuerung, Datenplattformen - Mixed-Traffic-Handling	B → A	SAE 4–5

Tabelle 11: Roadmap für Infrastruktur für autonomes Fahren

5.4.9 Konkretisierte Massnahmen je Phase

Phase 1 – Grundlagen schaffen (2025–2030)

- Digitale Zwillinge für Straßennetze
- Statische Infrastrukturkennzeichnung standardisieren
- ITS-G5 / C-V2X-Testfelder auf Autobahnen
- Zentrale Erfassung und Verteilung dynamischer Verkehrsdaten

Phase 2 – Kooperative Systeme etablieren (2030–2035)

- Ampeln, Kreuzungen mit Sensorik und V2I-Fähigkeit ausstatten
- Aufbau regionaler Verkehrsleitintelligenz
- Anbindung von ÖPNV, Fußgängern, Radverkehr an Verkehrsinfrastruktur
- Schaffung rechtlicher Grundlagen für Infrastruktursteuerung

Phase 3 – Skalierung & Standardisierung (2035–2045)

- Ausbau von ISAD-A-Zonen in urbanen Zentren und auf Fernstraßen
- Verkehrssteuerung durch kooperatives Infrastruktur-Fahrzeug-Zusammenspiel (z. B. Platooning, Kreuzungspriorisierung)
- Echtzeitfähige Verkehrslenkung durch AI-basierte Systeme
- Gesetzliche Integration von Infrastrukturverantwortung, Betrieb, Finanzierung

5.4.10 Phasenunabhängige Massnahmen

Begleitend über alle Phasen empfiehlt es sich folgende Themen zu beachten:

- Standardisierung auf EU-Ebene (ETSI, C-ITS, ISO, UNECE)
- Schulung und Kompetenzaufbau bei Straßenbau- und Verkehrsbehörden
- Monitoring und Evaluierung in Pilotregionen
- Internationale Interoperabilität (grenzüberschreitende Korridore)

6 Schlussfolgerung und Ausblick

6.1 Technische Entwicklung

Die Integration autonomer Fahrzeuge (AVs) in moderne Verkehrssysteme bietet vielfältige Chancen, aber auch erhebliche Herausforderungen. Diese Literaturrecherche unterstreicht die zentrale Rolle der Infrastruktur – insbesondere der V2X-Kommunikation – für die Leistungsfähigkeit und Sicherheit von AVs. Indem sie die Grenzen heutiger Sensor-, Lokalisierungs-, Planungs- und Steuerungssysteme adressiert, ermöglicht V2X eine nahtlose Interaktion zwischen Fahrzeugen und ihrer Umgebung. Dies führt zu sichererer, effizienterer und vorausschauender Navigation.
Trotz erheblicher Fortschritte in der Sensorik und Rechenleistung bestehen weiterhin Hürden, etwa durch ungünstige Wetterbedingungen, Sensorausfälle oder komplexe Verkehrsszenarien. Eine robuste, strassenseitige Infrastruktur mit geeigneten Sensor- und Kommunikationssystemen ist entscheidend, um diese Limitierungen zu überwinden.
Die Vorreiter dieser Entwicklung investieren in Testfelder und schaffen regulatorische Rahmenbedingungen, um den Einsatz von AVs zu ermöglichen. Dabei ist die kontinuierliche Zusammenarbeit zwischen öffentlichen Institutionen, Forschung und Industrie essenziell, um das volle Potenzial autonomer Mobilität auszuschöpfen. Die Zukunft autonomer Fahrzeuge hängt somit wesentlich von der erfolgreichen Integration fortschrittlicher Technologien und intelligenter Infrastruktur ab. Werden Sicherheit, Effizienz und Zuverlässigkeit gezielt gefördert, kann dies zur breiten gesellschaftlichen Akzeptanz beitragen und die Verkehrssysteme weltweit nachhaltig verändern.
Vor zehn Jahren befanden sich autonome Fahrzeuge noch weitgehend im experimentellen Stadium. Vor fünf Jahren wurden erstmals robuste Prototypen entwickelt – gestützt durch Fortschritte in KI und Sensortechnik. Heute erfolgen Tests in realen Umgebungen, und in einigen Regionen sind AVs bereits im öffentlichen Verkehr im Einsatz. Schlüsselfaktoren für die beschleunigte Einführung sind:

- Fortschritte in der Künstlichen Intelligenz,
- leistungsfähigere Sensoren,
- zuverlässige V2X-Kommunikation,
- und unterstützende Regulierungen.

Die enge Zusammenarbeit zwischen Technologieunternehmen und Behörden hat diesen Fortschritt erheblich beschleunigt. Gleichzeitig bestehen Risiken – etwa in den Bereichen Cybersicherheit, Ethik, Recht oder Systemverhalten unter Extrembedingungen. Robuste Sicherheitsarchitekturen und umfassende gesetzliche Standards sind erforderlich, um diese Risiken zu beherrschen. Auch die öffentliche Akzeptanz ist noch uneinheitlich. Sorgen um Sicherheit und Datenschutz dominieren. Aufklärung und Transparenz sind daher entscheidend, um Vertrauen aufzubauen. Die Schweiz verfolgt bei der Einführung von AVs einen proaktiven Ansatz, insbesondere im urbanen Raum. Ihre vielfältigen topografischen und klimatischen Bedingungen machen das Land zu einem idealen Testfeld, das wertvolle Erkenntnisse zur Systemresilienz liefert. Nächste

Schritte umfassen den Ausbau von Testumgebungen, die Verfeinerung regulatorischer Rahmen und die Förderung öffentlich-privater Partnerschaften.

6.2 Regulatorische Anforderungen

Gemäß den UN ECE-Regularien müssen AVs grundsätzlich unabhängig agieren können – auch ohne Infrastrukturunterstützung. Diese Anforderung führt dazu, dass OEM ihre Systeme primär fahrzeugseitig entwickeln. Um jedoch künftig komplexere Einsatzszenarien (ODD) und höhere Automatisierungsstufen (z. B. Level 4/5) sicher zu beherrschen, gewinnt die V2X-Kommunikation zunehmend an Bedeutung. Bereits heute erfolgen Tests, die Fahrzeug- und Infrastruktursensorik kombinieren und deren Zusammenspiel evaluieren. Einen Überblick der laufenden Projekte in der Schweiz bietet Kapitel 2.2.5

6.3 Infrastruktur: Ermöglichung oder Optimierung?

Es ist derzeit kaum möglich, konkrete Anforderungen an die Infrastruktur zur Ermöglichung von AV zu formulieren – da AVs regulatorisch unabhängig funktionieren müssen. Relevanter ist daher die Frage:

Was kann Infrastruktur beitragen, um den Verkehr insgesamt sicherer, effizienter und nachhaltiger zu gestalten – unabhängig vom Automatisierungsgrad der Fahrzeuge?

6.3.1 Mögliche Beiträge der Infrastruktur

- Frühwarnsysteme für alle Verkehrsteilnehmer
- Integration von motorisiertem Individualverkehr, ÖV und anderen Verkehrsteilnehmern
- Verkehrsflussoptimierung
- Reduktion von Stau und Emissionen
- Bereitstellung von Echtzeitdaten als Open Data

6.4 Zukunftsvision: Open Data & neue Geschäftsmodelle

Ein mögliches Zukunftsmodell wäre eine offene Dateninfrastruktur, z. B. durch das ASTRA, die in Echtzeit hochwertige Informationen bereitstellt (z. B. Verkehrslage, LSA-Zustände, Geschwindigkeitsbegrenzungen). Der private Sektor kann darauf aufbauend Geschäftsmodelle entwickeln, die ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Vorteile generieren. Hierbei liegt die Holschuld bei den AV-Herstellern: Sie müssen sicherheitsrelevante Informationen aus solchen Quellen aktiv integrieren – sofern sie bereitgestellt werden.

6.5 Gesamtgesellschaftlicher Nutzen & Inklusivität

Besonders wichtig ist die Erkenntnis, dass die Entwicklung intelligenter Infrastrukturen nicht nur den AVs selbst, sondern allen Verkehrsteilnehmern zugutekommt: vom Motorrad über das Fahrrad bis zum Fußgänger. Damit kann ein inklusiver, sicherer und nachhaltiger Verkehr geschaffen werden – jenseits der engen AV-Perspektive. Abbildung 28 zeigt eine exemplarische Zusammenfassung von verschiedenen Stakeholdern/Rollen im Strassenverkehr. Dabei stellen sich folgende Fragen:

- Wer profitiert von einem Nutzen aus einer neuen digitalen Dienstleistung?
- Wer soll für den Aufbau und die Betriebskosten aufkommen?

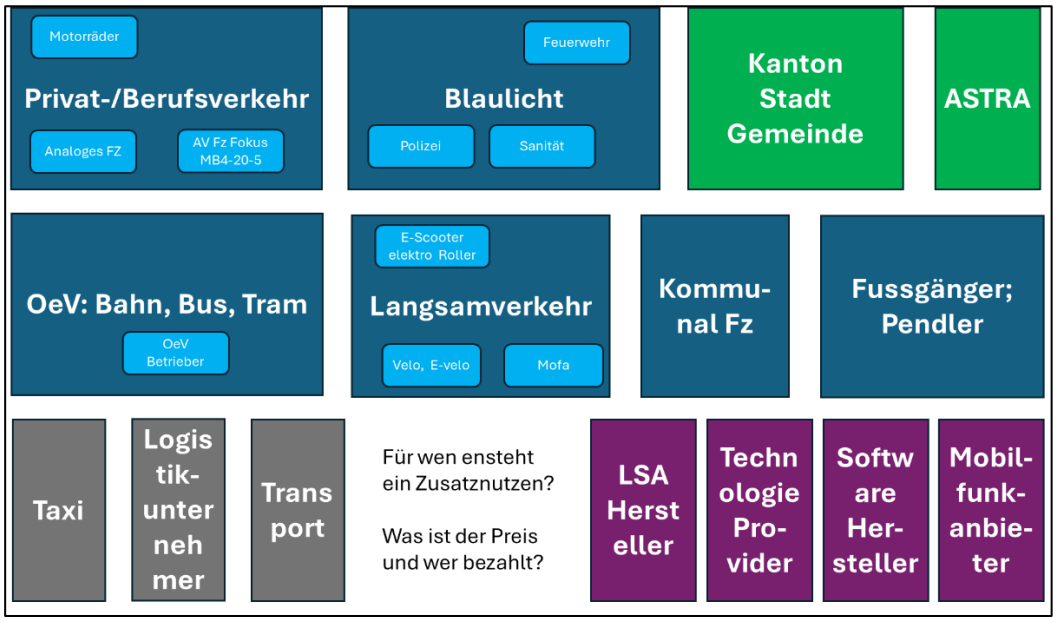

Abbildung 28: Darstellung verschiedener Rollen unabhängig von AV

Tabelle 12 zeigt den Nutzen von ausgewählten Dienstleistungen auf die aufgelisteten Rollen. Offensichtlich generiert die Verfügbarmachung von Verkehrsinformationen und Gefahrenwarnungen für die meisten Verkehrsteilnehmer einen Nutzen. Zum Zeitpunkt des Schreibens dieses Forschungsberichtes hat sicherlich der ÖV ein grosses Interesse an Automatisierten G-Modellen und priorisierter Steuerung von LSA. Erste Versuche gibt es zum Beispiel bereits in Österreich (Wien und Graz) und in der Schweiz (SAAM Projekte). Andererseits gibt es in skandinavischen und deutschen Städten Versuche mit Priorisierung des Langsamverkehrs mit Hilfe von smarten Lichtsignalanlagen. In der Schweiz laufen Versuche im Logistikbereich (Planzer) zur Automatisierung der letzten Meile.

Nutzen aus neuen Dienstleistungen (C-ITS) für verschiedene Rollen

Dienst-leistung	Privat Berufs-verkehr	Lang-sam-verkehr	Fuss-Gänger	ÖV	Blau-licht	SA CH/ASTRA	Neue G-Modelle
Einsatz-fahrzeuge priorisie-ren					✓		
ÖV prio-risieren			✓	✓			
Verkehrs-informa-tionen	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Gefah-renwar-nung	✓	✓	✓	✓	✓		
Fz Zäh-lungen						✓	✓
Fz Daten (Position, Geschw. Richtung)							✓
Car Poo-ling			✓				✓

Tabelle 12: Zusatznutzen für ausgewählte Rollen

6.6 Kooperativer intelligenter Verkehr: Realität, Herausforderungen und Perspektiven

Der Weg zu einem kooperativen, intelligenten Verkehrssystem ist gepflastert mit technischen, institutionellen und wirtschaftlichen Herausforderungen (vgl. Abbildung 29). Während die technologische Entwicklung stetig voranschreitet, mangelt es vielerorts an der Bereitschaft zur Kooperation – insbesondere zwischen Fahrzeugherstellern (OEM), Infrastrukturbetreibern und staatlichen Institutionen. Die entscheidende Frage ist die nach dem genierten individuellen Nutzen und die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit.

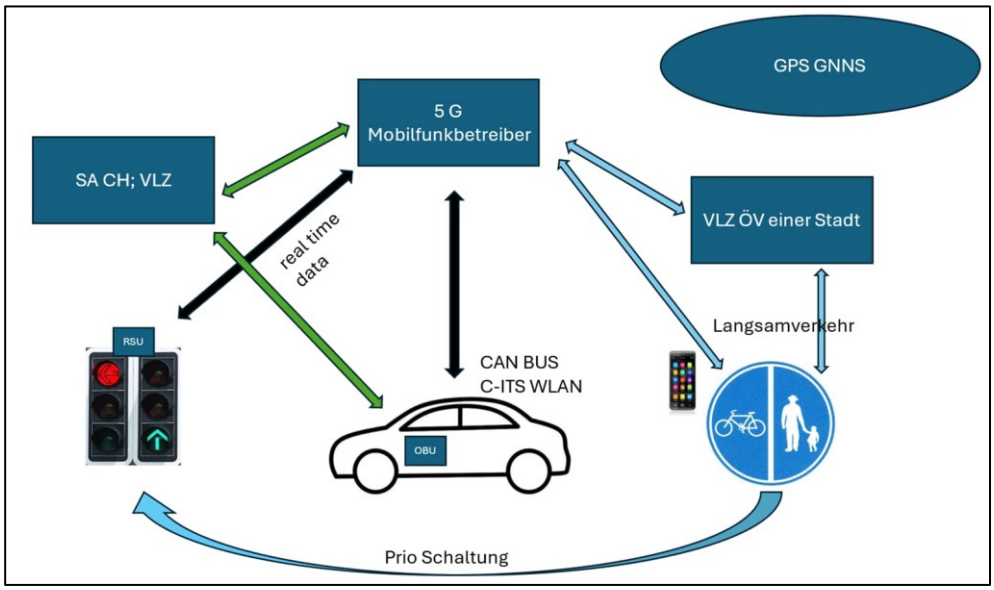

Abbildung 29: Prinzip: Beispiel, Elemente für eine Realisierung von C-ITV Datenwegen

Info-Box

Grün: Direkte Beeinflussung der Fahrzeuge
Schwarz: Datenfluss On Board Unit Mobilfunkbetreiber Road Side Unit an LSA
Blau: Priorisierung Langsamverkehr an der Ampel

6.7 Zusammenfassende Übersicht

Um die Einführung von automatisierten Fahrzeugen Vorschub zu leisten, braucht es koordinierte und gemeinsame Entwicklungsschritte unter Berücksichtigung eines Regulatorischen Umfeldes, welches sich permanent adaptiert. Dabei gilt es die Bedürfnisse der Gesellschaft einzubeziehen und dadurch die Technologie-Akzeptanz zu fördern (vgl. Abbildung 30).

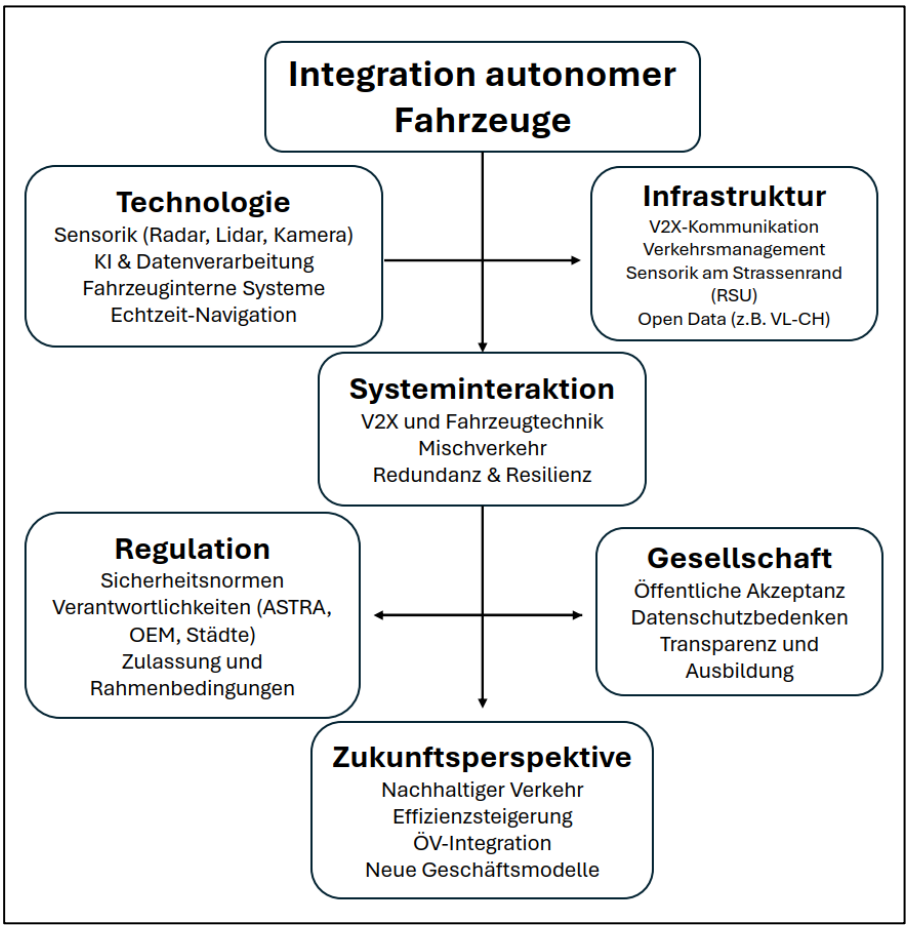

Abbildung 30: Graphische Zusammenfassung der Integration autonomer Fahrzeuge in ein künftiges Verkehrssystem

6.8 Weiterer Forschungsbedarf

Zusätzlicher Forschungsbedarf ergibt sich in mehreren Schlüsselbereichen, abhängig vom betrachteten Szenario (maximale vs. minimale Vernetzung) sowie vom ISAD-Reifegrad. In den folgenden Unterkapiteln werden jeweils mögliche, passende Forschungsfragen aufgeführt.

6.8.1 Interoperabilität & Standardisierung (insb. für Szenario I)

- Wie lassen sich Datenformate, Protokolle und Kommunikationsstandards europaweit harmonisieren?
- Wie kann die Interoperabilität zwischen Fahrzeugen verschiedener Hersteller und unterschiedlicher Infrastruktur gewährleistet werden?

6.8.2 Datenschutz & Datensouveränität

- Wie lassen sich personenbezogene und fahrzeugbezogene Daten rechtskonform, sicher und nutzbringend verarbeiten?
- Welche Governance-Modelle (z. B. Datentreuhand) sind geeignet, um öffentliche und private Interessen zu balancieren?

6.8.3 Wirtschaftliche Anreizmodelle & Geschäftsmodelle

- Wie können Investitionen in ISAD-Infrastruktur refinanziert werden (PPP-Modelle, Mobility-as-a-Service)?
- Welche Marktmodelle ermöglichen fairen Zugang zu Daten und Services?

6.8.4 Nutzerakzeptanz und Verhalten

- Wie reagieren Nutzer*innen auf unterschiedlich vernetzte Fahrzeuge?
- Welche Erwartungen bestehen an Transparenz, Kontrolle, Nutzen und Risiken?

6.8.5 Resilienz & Cybersicherheit

- Wie können kritische Mobilitätsinfrastrukturen gegen Angriffe, Ausfälle oder Fehlfunktionen abgesichert werden?
- Wie wirkt sich eine zunehmende Abhängigkeit von digitaler Infrastruktur auf die Systemstabilität aus?

6.8.6 Technologiebewertung & Wirkungsmessung

- Welchen realen Beitrag leisten ISAD-Level (v. a. B/A) zu CO_2-Reduktion, Effizienzsteigerung, Verkehrssicherheit?
- Wie lassen sich Testfelder skalieren und evaluieren?

6.8.7 Übergangsszenarien & Mischbetrieb

- Wie funktionieren ISAD-Level in einem Mischbetrieb mit nicht vernetzten Fahrzeugen (Level 0/SAE 0)?
- Wie lange müssen parallele Systeme betrieben werden?

Literaturverzeichnis

[1] C. C. ARAMIS, „ARAMIS: Das Informationssystem über Forschung+Entwicklung“. 3003 Bern, laufend.

[2] A. van Linn, R. Schneider, A. Kouvelas, M. Makridis, und A. Genser, „Automatisiertes Fahren im Strassentunnel: Chancen, Risiken und ideale Strecken“, *ASTRA UVEK Bern*, Bd. 1760, 2023.

[3] ASTRA, *Auswirkungen des automatisierten Fahrens: Erkenntnisse und Massnahmen aus Sicht des ASTRA*. Bern: UVEK, 2020.

[4] „Waymo - Self-Driving Cars - Autonomous Vehicles - Ride-Hail“, Waymo. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://waymo.com/

[5] „Autopilot and Full Self-Driving Capability | Tesla Support“, Tesla. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tesla.com/support/autopilot

[6] „Zero Congestion with Self-driving Vehicles | General Motors“. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gm.com/public/us/en/gm/home/innovation/path-to-autonomous.html

[7] „Autonomous Vehicle Market Size and Share | Statistics - 2030“. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.nextmsc.com/report/autonomous-vehicle-market

[8] „Autonomous Vehicles Factsheet“, Center for Sustainable Systems. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://css.umich.edu/publications/factsheets/mobility/autonomous-vehicles-factsheet

[9] „Self-Driving Car Accident Statistics“, Kisling, Nestico & Redick. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.knrlegal.com/car-accident-lawyer/self-driving-car-accident-statistics/

[10] A. Chougule, V. Chamola, A. Sam, F. R. Yu, und B. Sikdar, „A Comprehensive Review on Limitations of Autonomous Driving and Its Impact on Accidents and Collisions“, *IEEE Open J. Veh. Technol.*, Bd. 5, S. 142–161, 2024, doi: 10.1109/OJVT.2023.3335180.

[12] M. A. Khan, „Intelligent Environment Enabling Autonomous Driving“, *IEEE Access*, Bd. 9, S. 32997–33017, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059652.

[13] Bundesamt für Strassen, ASTRA, „Roads and Traffic 2022: Developments, facts and figures.“, ASTRA, Bern., Annual report, 2022.

[14] Bundesamt für Strassen, ASTRA, „Roads and Traffic 2023/2024: Developments, facts and figures“, ASTRA, Bern., 2024.

[15] „SAE Levels of Driving Automation™ Refined for Clarity and International Audience“. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sae.org/site/blog/sae-j3016-update

[16] J. Van Brummelen, M. O’Brien, D. Gruyer, und H. Najjaran, „Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow“, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Bd. 89, S. 384–406, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.trc.2018.02.012.

[17] Y. Lu, H. Ma, E. Smart, und H. Yu, „Real-Time Performance-Focused Localization Techniques for Autonomous Vehicle: A Review“, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Bd. 23, Nr. 7, S. 6082–6100, Juli 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3077800.

[18] W. Schwarting, J. Alonso-Mora, und D. Rus, „Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles“, *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.*, Bd. 1, Nr. Volume 1, 2018, S. 187–210, Mai 2018, doi: 10.1146/annurev-control-060117-105157.

[19] S. Kuutti, R. Bowden, Y. Jin, P. Barber, und S. Fallah, „A Survey of Deep Learning Applications to Autonomous Vehicle Control“, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Bd. 22, Nr. 2, S. 712–733, Feb. 2021, doi: 10.1109/TITS.2019.2962338.

[20] „Architecture overview“. [Online]. Verfügbar unter: https://autowarefoundation.github.io/autoware-documentation/main/design/autoware-architecture/

[21] „Modified autonomous vehicle trial concept“. Federal Roads Office FEDRO. Zugegriffen: 20. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/en/dokumente/abteilung_strassennetzeallgemein/pruefkonzept-umbau-automatisierte-fahrzeuge.pdf

[22] „BASt - Homepage - Digital Motorway Test Bed“. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bast.de/EN/Traffic_Engineering/Subjects/V5-digital-test-bed.html

[23] CGTN, „Autonomous driving shifts into high gear in China“. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://news.cgtn.com/news/2024-08-13/Autonomous-driving-shifts-into-high-gear-in-China-1w1LxTg4rcI/p.html

[24] „Attributes of physical and digital infrastructure for highly automated driving from EU EIP and MANTRA.“ Zugegriffen: 25. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.its-platform.eu/wp-content/uploads/ITS-Platform/Achievements-Documents/AutomatedDriving/10_List_PhysicalDigital_Infra_attributes_EU_EIP-MANTRA_20201231.pdf

[25] M. Sadaf *u. a.*, „Connected and Automated Vehicles: Infrastructure, Applications, Security, Critical Challenges, and Future Aspects“, *Technologies*, Bd. 11, Nr. 5, Art. Nr. 5, Okt. 2023, doi: 10.3390/technologies11050117.

[26] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., „MHI Group to Participate in Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Demonstration Test Program to Support Autonomous Highway Driving -- Groupwide Technologies to Help Achieve Autonomous Driving Society“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mhi.com/news/22100502.html

[27] „About C-ITS | CAR 2 CAR Communication Consortium“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.car-2-car.org/about-c-its

[28] S. Mathi, „What Drives a Driverless Car?“, OneZero. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://onezero.medium.com/what-drives-a-driverless-car-5a5f43367354

[29] „USDOT ITS Research - Connected Vehicle Pilot Deployment Program“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.its.dot.gov/pilots/

[30] „C-V2X-Pilot-and-Demonstration-Areas-in-China.pdf“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://5gaa.org/content/uploads/2022/10/C-V2X-Pilot-and-Demonstration-Areas-in-China.pdf

[31] *Directive 2008/96/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on road infrastructure safety management*, Bd. 319. 2008. Zugegriffen: 2. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/dir/2008/96/oj/eng

[32] *Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council of 7 July 2010 on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport Text with EEA relevance*, Bd. 207. 2010. Zugegriffen: 2. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/dir/2010/40/oj/eng

[33] „European Deployment Guidelines for Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS).“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.itsstandards.eu/app/uploads/sites/14/2020/10/C-ITS-Brochure-2020-FINAL.pdf

[34] „Regulation 2019/2144 - Type-approval requirements for motor vehicles and their trailers, and systems, components and separate technical units intended for such vehicles, as regards their general safety and the protection of vehicle occupants and vulnerable road users - EU monitor“. Zugegriffen: 2. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j4nvk6yhcb-peywk_j9vvik7m1c3gyxp/vl4j8yycs6xo

[35] „Texts adopted - EU Road Safety Policy Framework 2021-2030 – Recommendations on next steps towards ‚Vision Zero‘ - Wednesday, 6 October 2021“. Zugegriffen: 2. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0407_EN.html

[36] „SR 741.59 - Verordnung vom 13. Dezember 2024 übe... | Fedlex“. Zugegriffen: 31. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2025/50/de

[37] B. für V. BAV, „Daten für ein effizientes Mobilitätssystem“. Zugegriffen: 31. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/allgemeine-themen/mmm.html

[38] O. fédéral des routes OFROU, „Essai pilote Alerte embouteillage“. Zugegriffen: 21. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.astra.admin.ch/astra/fr/home/themen/intelligente-mobilitaet/floating-car-data/pilotversuch_stauendwarnung.html

[39] „Verkehrsnetz CH“. Zugegriffen: 31. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.swisstopo.admin.ch/de/projekt-verkehrsnetz-ch

[40] H. Gupta, O. Kotlyar, H. Andreasson, und A. J. Lilienthal, „Robust Object Detection in Challenging Weather Conditions“, in *2024 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, Waikoloa, HI, USA: IEEE, Jan. 2024, S. 7508–7517. doi: 10.1109/WACV57701.2024.00735.

[41] Y. Zhang, A. Carballo, H. Yang, und K. Takeda, „Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions: A survey“, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, Bd. 196, S. 146–177, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2022.12.021.

[42] „Why weather is a problem for autonomous vehicle safety“, Geotab. Zugegriffen: 15. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.geotab.com/blog/autonomous-vehicles-safety-2/

[43] G. Kiss, „External manipulation recognition modul in self-driving vehicles“, in *2019 IEEE 17th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, Sep. 2019, S. 000231–000234. doi: 10.1109/SISY47553.2019.9111547.

[44] B. G. B. Stottelaar, „Practical cyber-attacks on autonomous vehicles“. Zugegriffen: 15. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://essay.utwente.nl/66766/

[45] „Researcher Hacks Self-driving Car Sensors - IEEE Spectrum“. Zugegriffen: 15. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://spectrum.ieee.org/researcher-hacks-self-driving-car-sensors

[46] K. Moller, R. Trauth, und J. Betz, „Overcoming Blind Spots: Occlusion Considerations for Improved Autonomous Driving Safety“, in *2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Juni 2024, S. 819–826. doi: 10.1109/IV55156.2024.10588481.

[47] Bosch Mobility, „Localization for automated driving“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/automated-driving/localization-for-automated-driving/#:~:text=Localization%20approach%20in%20detail&text=The%20road%20signature%20enables%20reliable,from%20radar%20and%20video%20sensors.&text=Inertial%20sensors%20are%20used%20to,of%20satellite%20and%20surround%20information.

[48] F. Zhang, Z. Wang, Y. Zhong, und L. Chen, „Localization Error Modeling for Autonomous Driving in GPS Denied Environment“, *Electronics*, Bd. 11, Nr. 4, Art. Nr. 4, Jan. 2022, doi: 10.3390/electronics11040647.

[49] „A Survey on Map-Based Localization Techniques for Autonomous Vehicles | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9833300

[50] S. Liu, L. Liu, J. Tang, B. Yu, Y. Wang, und W. Shi, „Edge Computing for Autonomous Driving: Opportunities and Challenges“, *Proc. IEEE*, Bd. 107, Nr. 8, S. 1697–1716, Aug. 2019, doi: 10.1109/JPROC.2019.2915983.

[51] R. Uppala, „Path planning for an Autonomous Vehicle“. [Online]. Verfügbar unter: https://medium.com/@techreigns/path-planning-for-an-autonomous-vehicle-aided-by-sensor-fusion-data-80dfcdeaf3f1

[52] X. Tang *u. a.*, „Prediction-Uncertainty-Aware Decision-Making for Autonomous Vehicles“, *IEEE Trans. Intell. Veh.*, Bd. 7, Nr. 4, S. 849–862, Dez. 2022, doi: 10.1109/TIV.2022.3188662.

[53] D. Patel und R. Zalila-Wenkstern, „Collaborative Collision Avoidance for CAVs in Unpredictable Scenarios“, in *2020 IEEE 3rd Connected and Automated Vehicles Symposium (CAVS)*, Nov. 2020, S. 1–6. doi: 10.1109/CAVS51000.2020.9334661.

[54] K. Evans, N. de Moura, S. Chauvier, R. Chatila, und E. Dogan, „Ethical Decision Making in Autonomous Vehicles: The AV Ethics Project“, *Sci. Eng. Ethics*, Bd. 26, Nr. 6, S. 3285–3312, Dez. 2020, doi: 10.1007/s11948-020-00272-8.

[55] J. Rhim, J.-H. Lee, M. Chen, und A. Lim, „A Deeper Look at Autonomous Vehicle Ethics: An Integrative Ethical Decision-Making Framework to Explain Moral Pluralism“, *Front. Robot. AI*, Bd. 8, Mai 2021, doi: 10.3389/frobt.2021.632394.

[56] J. Fefer, „The role of V2X in vehicle automation - today and tomorrow“, Autotalks. [Online]. Verfügbar unter: https://auto-talks.com/the-role-of-v2x-in-vehicle-automation-today-and-tomorrow/

[57] appeal.admin, „What is V2X technology?“, AB Dynamics. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.abdynamics.com/v2x-a-game-changing-technology-to-improve-road-safety/

[58] „Enhancing Safety and Efficiency in Traffic Management through Vehicle-to-Everything (V2X) Communication - The Swiss Quality Consulting: Digital Transformation Services“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://theswiss-quality.ch/enhancing-safety-and-efficiency-in-traffic-management-through-vehicle-to-everything-v2x-communication/

[59] V. R. Tomás, L. A. García, und A. L. Alonso, „An agent-based platform to evaluate V2X routing road traffic scenarios“, *Simul. Model. Pract. Theory*, Bd. 125, S. 102750, Mai 2023, doi: 10.1016/j.simpat.2023.102750.

[60] P. Koopman und F. Fratrik, „How Many Operational Design Domains, Objects, and Events?“, 2019.

[61] S. Ulrich *u. a.*, „MANTRA: Making full use of Automation for National Transport and Road Authorities – NRA Core Business“.

[62] A. Carreras, X. Daura, J. Erhart, und S. Ruehrup, „Road infrastructure support levels for automated driving“, Sep. 2018.

[63] M. H. S. R. S. S. Y. W. J. Erhart, „Infrastructure support for automated driving: Further enhancements on the ISAD classes in Austria“, in *Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA 2020*, Helsinki Finland, Apr. 2020.

[64] „Provision and exchange of data for automated driving in road traffic“,. Federal Department of Environment, Transport, Energy and communications DETEC. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/en/dokumente/abteilung_strassennetzeallgemein/Data_AD_Road_Traffic.pdf.download.pdf/dataadroadtraffic.pdf

[65] „Transport of the future 2060: Synthesis Report“,. Federal Road Office. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.astra.admin.ch/dam/astra/fr/dokumente/abteilung_strassennetzeallgemein/21774_1685_Inhalt_EN.pdf.download.pdf/21774_1685_Inhalt_EN.pdf

[66] „Distant Vehicle Detection Using Radar and Vision | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8794312

[67] Y. Feng, S. Pickering, E. Chappell, P. Iravani, und C. Brace, „Distance Estimation by Fusing Radar and Monocular Camera with Kalman Filter: SAE Intelligent and Connected Vehicle Symposium 2017“, *SAE Intell. Connect. Veh. Symp.*, Sep. 2017.

[68] A. Zaarane, I. Slimani, W. Al Okaishi, I. Atouf, und A. Hamdoun, „Distance measurement system for autonomous vehicles using stereo camera“, *Array*, Bd. 5, S. 100016, März 2020, doi: 10.1016/j.array.2020.100016.

[69] F. Valocký, P. Drahoš, und O. Haffner, „Measure distance between Camera and Object using Camera Sensor“, in *2020 Cybernetics & Informatics (K&I)*, Jan. 2020, S. 1–4. doi: 10.1109/KI48306.2020.9039879.

[70] S. Martínez-Díaz, „3D Distance Measurement from a Camera to a Mobile Vehicle, Using Monocular Vision“, *J. Sens.*, Bd. 2021, Nr. 1, S. 5526931, 2021, doi: 10.1155/2021/5526931.

[71] A. de L. Bourdonnaye, R. Doskočil, V. Křivánek, und A. Štefek, „Practical Experience with Distance Measurement Based on Single Visual Camera“, *Adv. Mil. Technol.*, Bd. 7, Nr. 2, Art. Nr. 2, 2012.

[72] „Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9127855

[73] D. Bastos, P. P. Monteiro, A. S. R. Oliveira, und M. V. Drummond, „An Overview of LiDAR Requirements and Techniques for Autonomous Driving“, in *2021 Telecoms Conference (Conf^{TEL}E)*, Feb. 2021, S. 1–6. doi: 10.1109/Conf^{TEL}E50222.2021.9435580.

[74] F. Zhang, L. Yi, und X. Qu, „Simultaneous measurements of velocity and distance via a dual-path FMCW lidar system“, *Opt. Commun.*, Bd. 474, S. 126066, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.optcom.2020.126066.

[75] „Detection scheme for a partially occluded pedestrian based on occluded depth in lidar–radar sensor fusion“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-56/issue-11/113112/Detection-scheme-for-a-partially-occluded-pedestrian-based-on-occluded/10.1117/1.OE.56.11.113112.full

[76] D.-H. Paek, S.-H. Kong, und K. T. Wijaya, „K-Radar: 4D Radar Object Detection for Autonomous Driving in Various Weather Conditions“, *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, Bd. 35, S. 3819–3829, Dez. 2022.

[77] „The Rise of Radar for Autonomous Vehicles: Signal Processing Solutions and Future Research Directions | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8828025

[78] M. I. Hussain, S. Azam, F. Munir, Z. Khan, und M. Jeon, „Multiple Objects Tracking using Radar for Autonomous Driving“, in *2020 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, Sep. 2020, S. 1–4. doi: 10.1109/IEMTRONICS51293.2020.9216363.

[79] D. Bell, W. Xiao, und P. James, „ACCURATE VEHICLE SPEED ESTIMATION FROM MONOCULAR CAMERA FOOTAGE“, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Bd. V-2–2020, S. 419–426, Aug. 2020, doi: 10.5194/isprs-annals-V-2-2020-419-2020.

[80] Z. Tang, G. Wang, H. Xiao, A. Zheng, und J.-N. Hwang, „Single-Camera and Inter-Camera Vehicle Tracking and 3D Speed Estimation Based on Fusion of Visual and Semantic Features“, gehalten auf der Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2018, S. 108–115. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2018_workshops/w3/html/Tang_Single-Camera_and_Inter-Camera_CVPR_2018_paper.html?ref=https://coder.social

[81] „Vehicle speed estimation using a monocular camera“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9407/940704/Vehicle-speed-estimation-using-a-monocular-camera/10.1117/12.2083394.full

[82] S. Doğan, M. S. Temiz, und S. Külür, „Real Time Speed Estimation of Moving Vehicles from Side View Images from an Uncalibrated Video Camera“, *Sensors*, Bd. 10, Nr. 5, Art. Nr. 5, Mai 2010, doi: 10.3390/s100504805.

[83] P. Giannakeris, V. Kaltsa, K. Avgerinakis, A. Briassouli, S. Vrochidis, und I. Kompatsiaris, „Speed Estimation and Abnormality Detection From Surveillance Cameras“, gehalten auf der Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2018, S. 93–99. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2018_workshops/w3/html/Giannakeris_Speed_Estimation_and_CVPR_2018_paper.html

[84] J. Zhang, W. Xiao, B. Coifman, und J. P. Mills, „Vehicle Tracking and Speed Estimation From Roadside Lidar“, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, Bd. 13, S. 5597–5608, 2020, doi: 10.1109/JSTARS.2020.3024921.

[85] E. Dayangac, F. Baumann, J. Aulinas, und M. Zobel, „Target Position and Speed Estimation Using LiDAR“, in *Image Analysis and Recognition*, A. Campilho und F. Karray, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 470–477. doi: 10.1007/978-3-319-41501-7_53.

[86] S. Saponara, M. S. Greco, und F. Gini, „Radar-on-Chip/in-Package in Autonomous Driving Vehicles and Intelligent Transport Systems: Opportunities and Challenges“, *IEEE Signal Process. Mag.*, Bd. 36, Nr. 5, S. 71–84, Sep. 2019, doi: 10.1109/MSP.2019.2909074.

[87] P. R. M. de Araujo, M. Elhabiby, S. Givigi, und A. Noureldin, „A Novel Method for Land Vehicle Positioning: Invariant Kalman Filters and Deep-Learning-Based Radar Speed Estimation“, *IEEE Trans. Intell. Veh.*, Bd. 8, Nr. 9, S. 4275–4286, Sep. 2023, doi: 10.1109/TIV.2023.3287790.

[88] A. Sharma und R. T. Tan, „Nighttime Visibility Enhancement by Increasing the Dynamic Range and Suppression of Light Effects“, gehalten auf der Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2021, S. 11977–11986. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2021/html/Sharma_Nighttime_Visibility_Enhancement_by_Increasing_the_Dynamic_Range_and_Suppression_CVPR_2021_paper.html

[89] „Mitigation of Visibility Loss for Advanced Camera-Based Driver Assistance | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5453086

[90] H. Ngo, L. Tao, M. Zhang, A. Livingston, und V. Asari, „A Visibility Improvement System for Low Vision Drivers by Nonlinear Enhancement of Fused Visible and Infrared Video“, in *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) - Workshops*, Sep. 2005, S. 25–25. doi: 10.1109/CVPR.2005.400.

[91] R. T. Tan, N. Pettersson, und L. Petersson, „Visibility Enhancement for Roads with Foggy or Hazy Scenes“, in *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Juni 2007, S. 19–24. doi: 10.1109/IVS.2007.4290085.

[92] Z. Ying, G. Li, Y. Ren, R. Wang, und W. Wang, „A New Low-Light Image Enhancement Algorithm Using Camera Response Model“, gehalten auf der Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, 2017, S. 3015–3022. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2017_workshops/w43/html/Ying_A_New_Low-Light_ICCV_2017_paper.html

[93] R.-C. Miclea, V.-I. Ungureanu, F.-D. Sandru, und I. Silea, „Visibility Enhancement and Fog Detection: Solutions Presented in Recent Scientific Papers with Potential for Application to Mobile Systems“, *Sensors*, Bd. 21, Nr. 10, Art. Nr. 10, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21103370.

[94] R.-C. Miclea, C. Dughir, F. Alexa, F. Sandru, und I. Silea, „Laser and LIDAR in a System for Visibility Distance Estimation in Fog Conditions“, *Sensors*, Bd. 20, Nr. 21, Art. Nr. 21, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20216322.

[95] Z. N. Aldoski und C. Koren, „Improving Autonomous Vehicle Perception through Evaluating LiDAR Capabilities and Handheld Retroreflectivity Assessments“, *Sensors*, Bd. 24, Nr. 11, Art. Nr. 11, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24113304.

[96] „Automotive LIDAR sensor development scenarios for harsh weather conditions | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7795565

[97] „Harmonic clutter recognition and suppression for automotive radar sensors - Jae-Eun Lee, Hae-Seung Lim, Seong-Hee Jeong, Hyun-Chool Shin, Seong-Wook Lee, Seong-

Cheol Kim, 2017“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1550147717729793

[98] „Perception Through 2D-MIMO FMCW Automotive Radar Under Adverse Weather | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9551127

[99] M. Sheeny, E. De Pellegrin, S. Mukherjee, A. Ahrabian, S. Wang, und A. Wallace, „RADIATE: A Radar Dataset for Automotive Perception in Bad Weather“, in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Mai 2021, S. 1–7. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9562089.

[100] G. Prabhakar, B. Kailath, S. Natarajan, und R. Kumar, „Obstacle detection and classification using deep learning for tracking in high-speed autonomous driving“, in *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, Juli 2017, S. 1–6. doi: 10.1109/TENCONSpring.2017.8069972.

[101] „No Blind Spots: Full-Surround Multi-Object Tracking for Autonomous Vehicles Using Cameras and LiDARs | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8818343

[102] „Machine learning in tracking associations with stereo vision and lidar observations for an autonomous vehicle | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7535456

[103] P. Nguyen, K. G. Quach, C. N. Duong, N. Le, X.-B. Nguyen, und K. Luu, „Multi-Camera Multiple 3D Object Tracking on the Move for Autonomous Vehicles“, gehalten auf der Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2022, S. 2569–2578. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2022W/Precognition/html/Nguyen_Multi-Camera_Multiple_3D_Object_Tracking_on_the_Move_for_Autonomous_CVPRW_2022_paper.html

[104] I. Baek, A. Davies, G. Yan, und R. R. Rajkumar, „Real-time Detection, Tracking, and Classification of Moving and Stationary Objects using Multiple Fisheye Images“, in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Juni 2018, S. 447–452. doi: 10.1109/IVS.2018.8500455.

[105] J. Choi, S. Ulbrich, B. Lichte, und M. Maurer, „Multi-Target Tracking using a 3D-Lidar sensor for autonomous vehicles“, in *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, Okt. 2013, S. 881–886. doi: 10.1109/ITSC.2013.6728343.

[106] „Object Classification Using CNN-Based Fusion of Vision and LIDAR in Autonomous Vehicle Environment | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8331162

[107] M. Yoshioka, N. Suganuma, K. Yoneda, und M. Aldibaja, „Real-time object classification for autonomous vehicle using LIDAR“, in *2017 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS)*, Nov. 2017, S. 210–211. doi: 10.1109/ICIIBMS.2017.8279696.

[108] „Towards autonomous driving in a parking garage: Vehicle localization and tracking using environment-embedded LIDAR sensors | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6629569

[109] „Sensors | Free Full-Text | A Pedestrian Detection Scheme Using a Coherent Phase Difference Method Based on 2D Range-Doppler FMCW Radar“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mdpi.com/1424-8220/16/1/124

[110] C. Avdogdu, N. Garcia, und H. Wymeersch, „Improved Pedestrian Detection under Mutual Interference by FMCW Radar Communications“, in *2018 IEEE 29th Annual*

International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sep. 2018, S. 101–105. doi: 10.1109/PIMRC.2018.8581028.

[111] A. Manjunath, Y. Liu, B. Henriques, und A. Engstle, „Radar Based Object Detection and Tracking for Autonomous Driving“, in *2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*, Apr. 2018, S. 1–4. doi: 10.1109/ICMIM.2018.8443497.

[112] „Sensor Radar for Object Tracking | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 16. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8365918

[113] T. D. Borba, O. Vaculín, H. Marzbani, und R. N. Jazar, „Increasing Safety of Automated Driving by Infrastructure-Based Sensors“, *IEEE Access*, Bd. 11, S. 94974–94991, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3311136.

[114] „A Survey of Vision-Based Traffic Monitoring of Road Intersections | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7458203

[115] S. K. und A. Kumar, „Detection and Recognition of Road Traffic Signs - A Survey“, *Int. J. Comput. Appl.*, Bd. 160, Nr. 3, S. 1–5, Feb. 2017, doi: 10.5120/ijca2017913038.

[116] „Deep Neural Network Based Vehicle and Pedestrian Detection for Autonomous Driving: A Survey | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9440863

[117] M. Bijelic *u. a.*, „Seeing Through Fog Without Seeing Fog: Deep Multimodal Sensor Fusion in Unseen Adverse Weather“, gehalten auf der Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020, S. 11682–11692. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2020/html/Bijelic_Seeing_Through_Fog_Without_Seeing_Fog_Deep_Multimodal_Sensor_Fusion_CVPR_2020_paper.html

[118] T. Rothmeier und W. Huber, „Let it Snow: On the Synthesis of Adverse Weather Image Data“, in *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Sep. 2021, S. 3300–3306. doi: 10.1109/ITSC48978.2021.9565008.

[119] „Centre for Connected and Autonomous Automotive Research“. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.coventry.ac.uk/research/areas-of-research/centre-for-future-transport-and-cities/our-facilities/centre-for-connected-autonomous-automotive-research/

[120] „Autonomous cars hit French roads“, CNRS News. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://news.cnrs.fr/articles/autonomous-cars-hit-french-roads

[121] M. Hahner, C. Sakaridis, D. Dai, und L. Van Gool, „Fog Simulation on Real LiDAR Point Clouds for 3D Object Detection in Adverse Weather“, gehalten auf der Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2021, S. 15283–15292. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://openaccess.thecvf.com/content/ICCV2021/html/Hahner_Fog_Simulation_on_Real_LiDAR_Point_Clouds_for_3D_Object_ICCV_2021_paper.html

[122] „CNN-Based Lidar Point Cloud De-Noising in Adverse Weather | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8990038

[123] „Evaluation of low-cost LiDAR sensor for application in indoor UAV navigation | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8336719

[124] „Evaluating the Limits of a LiDAR for an Autonomous Driving Localization | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9059023

[125] S. Ladra, M. R. Luaces, J. R. Paramá, und F. Silva-Coira, „Space- and Time-Efficient Storage of LiDAR Point Clouds“, in *String Processing and Information Retrieval*, N. R. Brisaboa und S. J. Puglisi, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 513–527. doi: 10.1007/978-3-030-32686-9_36.

[126] C. Wang, F. Hu, D. Sha, und X. Han, „EFFICIENT LIDAR POINT CLOUD DATA MANAGING AND PROCESSING IN A HADOOP-BASED DISTRIBUTED FRAMEWORK“, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Bd. IV-4-W2, S. 121–124, Okt. 2017, doi: 10.5194/isprs-annals-IV-4-W2-121-2017.

[127] W. Tang, E. Liu, Y. Hao, A. Huang, Z. Wang, und J. Wu, „An Effective Way of Constructing Static Map Using 3-D LiDAR for Autonomous Navigation in Outdoor Environments“, *IEEE Sens. J.*, Bd. 23, Nr. 19, S. 23608–23620, Okt. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3307398.

[128] G. Lei, W. Jianqiang, und L. Keqiang, „Lane Keeping System Based on THASV-II Platform“, in *2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, Dez. 2006, S. 305–308. doi: 10.1109/ICVES.2006.371604.

[129] P. Lindner, E. Richter, G. Wanielik, K. Takagi, und A. Isogai, „Multi-channel lidar processing for lane detection and estimation“, in *2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Okt. 2009, S. 1–6. doi: 10.1109/ITSC.2009.5309704.

[130] „Deep 3D Object Detection Networks Using LiDAR Data: A Review | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9181591

[131] „Paris-Saclay Autonomous Lab: new autonomous, electric and shared mobility services“, Newsroom Renault Group. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://media.renaultgroup.com/paris-saclay-autonomous-lab-new-autonomous-electric-and-shared-mobility-services/

[132] C. Creß *u. a.*, „A9-Dataset: Multi-Sensor Infrastructure-Based Dataset for Mobility Research“, 13. Mai 2022, *arXiv*: arXiv:2204.06527. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: http://arxiv.org/abs/2204.06527

[133] K. Zhu, S. Chen, J. Shi, Z. Zhu, und N. Zheng, „Localization of Autonomous Vehicles in Tunnels Based on Roadside Multi-sensor Fusion“, *IEEE Trans. Intell. Veh.*, S. 1–13, 2024, doi: 10.1109/TIV.2024.3401191.

[134] F. Majer, Z. Yan, G. Broughton, Y. Ruichek, und T. Krajník, „Learning to see through haze: Radar-based Human Detection for Adverse Weather Conditions“, in *2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, Sep. 2019, S. 1–7. doi: 10.1109/ECMR.2019.8870954.

[135] M. Mielle, M. Magnusson, und A. J. Lilienthal, „A comparative analysis of radar and lidar sensing for localization and mapping“, in *2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, Sep. 2019, S. 1–6. doi: 10.1109/ECMR.2019.8870345.

[136] „Test track A9 - A public experimental laboratory for autonomous driving“. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sennder.com/blog/test-track-a9-a-public-experimental-laboratory-for-autonomous-driving

[137] „Finding the way forward: Location data to enable connected and automated mobility“, GOV.UK. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gov.uk/government/publications/finding-the-way-forward-location-data-to-enable-connected-and-automated-mobility/finding-the-way-forward-location-data-to-enable-connected-and-automated-mobility

[138] C. Chen, K. Petty, A. Skabardonis, P. Varaiya, und Z. Jia, „Freeway Performance Measurement System: Mining Loop Detector Data“, *Transp. Res. Rec.*, Bd. 1748, Nr. 1, S. 96–102, Jan. 2001, doi: 10.3141/1748-12.

[139] J. Kwon, B. Coifman, und P. Bickel, „Day-to-Day Travel-Time Trends and Travel-Time Prediction from Loop-Detector Data“, *Transp. Res. Rec.*, Bd. 1717, Nr. 1, S. 120–129, Jan. 2000, doi: 10.3141/1717-15.

[140] „Intelligent traffic light controller using inductive loops for vehicle detection | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7375173

[141] A. Genser, M. A. Makridis, K. Yang, L. Abmühl, M. Menendez, und A. Kouvelas, „A traffic signal and loop detector dataset of an urban intersection regulated by a fully

actuated signal control system“, *Data Brief*, Bd. 48, S. 109117, Juni 2023, doi: 10.1016/j.dib.2023.109117.

[142] X. Jiang, F. R. Yu, T. Song, und V. C. M. Leung, „Intelligent Resource Allocation for Video Analytics in Blockchain-Enabled Internet of Autonomous Vehicles With Edge Computing“, *IEEE Internet Things J.*, Bd. 9, Nr. 16, S. 14260–14272, Aug. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2020.3026354.

[143] A. Rasheed *u. a.*, „Application-Aware Hierarchical Offloading for MEC-Enabled Autonomous Vehicle Architecture“, in *2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps*, Dez. 2020, S. 1–6. doi: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367480.

[144] I. Sorkhoh, C. Assi, D. Ebrahimi, und S. Sharafeddine, „Optimizing Information Freshness for MEC-Enabled Cooperative Autonomous Driving“, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Bd. 23, Nr. 8, S. 13127–13140, Aug. 2022, doi: 10.1109/TITS.2021.3119961.

[145] J. Liu, Z. Wang, C. Zhang, C. Gu, M. Pan, und X. Zhang, „Adaptive Data Transmission and Task Scheduling for High-Definition Map Update“, in *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*, Z. Liu, F. Wu, und S. K. Das, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 450–462. doi: 10.1007/978-3-030-86137-7_48.

[146] R.-H. Huang, B.-J. Chang, Y.-L. Tsai, und Y.-H. Liang, „Mobile Edge Computing-Based Vehicular Cloud of Cooperative Adaptive Driving for Platooning Autonomous Self Driving“, in *2017 IEEE 7th International Symposium on Cloud and Service Computing (SC2)*, Nov. 2017, S. 32–39. doi: 10.1109/SC2.2017.13.

[147] S. Yang, J. Tan, T. Lei, und B. Linares-Barranco, „Smart Traffic Navigation System for Fault-Tolerant Edge Computing of Internet of Vehicle in Intelligent Transportation Gateway“, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Bd. 24, Nr. 11, S. 13011–13022, Nov. 2023, doi: 10.1109/TITS.2022.3232231.

[148] Z. Huang, S. Chen, Y. Pian, Z. Sheng, S. Ahn, und D. A. Noyce, „Toward C-V2X Enabled Connected Transportation System: RSU-Based Cooperative Localization Framework for Autonomous Vehicles“, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, S. 1–15, 2024, doi: 10.1109/TITS.2024.3410185.

[149] M. D. Thao Chan, Z. Nan, Y. Jia, S. Zhou, und Z. Niu, „RSU-Aided Energy-Efficient Collaborative Perception for Connected Autonomous Vehicles“, in *2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Apr. 2024, S. 1–6. doi: 10.1109/WCNC57260.2024.10570667.

[150] H. Heng Ng *u. a.*, „BESAFE: Design and Implementation of a DSRC-Based Test-Bed for Connected Autonomous Vehicles“, in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Nov. 2018, S. 3742–3748. doi: 10.1109/ITSC.2018.8569302.

[151] „IEEE Standards Association“, IEEE Standards Association. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://standards.ieee.org/ieee/802.11p/3953/

[152] AUTOCRYPT, „The V2X Deployment Roadmap in Europe: What to Expect by 2024“, AUTOCRYPT. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://autocrypt.io/v2x-deployment-roadmap-europe-2024/

[153] M. Kutila, P. Pyykonen, Q. Huang, W. Deng, W. Lei, und E. Pollakis, „C-V2X Supported Automated Driving“, in *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Mai 2019, S. 1–5. doi: 10.1109/ICCW.2019.8756871.

[154] „Release 14“, 3GPP. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-14

[155] European 5G Observatory, „5G Corridors“. [Online]. Verfügbar unter: https://5gobservatory.eu/5g-corridors/

[156] „NXP, Volkswagen and Partners continue to accelerate the V2X rollout“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: http://www.nxp.com/company/blog/nxp-volkswagen-and-partners-continue-to-accelerate-the-v2x-rollout:BL-THE-V2X-ROLLOUT

[157] „5GAA, BMW Group, Ford and Groupe PSA Exhibit First European C-V2X Direct Communication Interoperability Between Multiple Automakers | Ford of Europe | Ford Media Center“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://media.ford.com/content/fordmedia/feu/en/news/2018/07/11/-5gaa--bmw-group--ford-and-groupe-psa--exhibit-first-european-c-.html

[158] „Automotive Cybersecurity | Mobility Solutions“, AUTOCRYPT. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://autocrypt.io/

[159] „5GAA_S-210019_Position-paper-on-European-deployment-band-configuration-for-C-V2X_final.pdf“. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://5gaa.org/content/uploads/2021/06/5GAA_S-210019_Position-paper-on-European-deployment-band-configuration-for-C-V2X_final.pdf

[160] „THE EUROPEAN TABLE OF FREQUENCY ALLOCATIONS AND APPLICATIONS IN THE FREQUENCY RANGE 8.3 kHz to 3000 GHz (ECA TABLE)“,. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://docdb.cept.org/download/4316

[161] „D5.1 Definition of V2X message sets“,. EU Transition Areas for Infrastructure-Assisted Driving. Zugegriffen: 26. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c7276b79&appId=PPGMS

[162] „Platform: C-Roads“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.c-roads.eu/platform.html

[163] „CAR 2 CAR Communication Consortium | CAR 2 CAR Communication Consortium“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.car-2-car.org/

[164] M. Houmer, M. Ouaissa, und M. Ouaissa, „Secure Authentication Scheme for 5G-based V2X Communications“, *Procedia Comput. Sci.*, Bd. 198, S. 276–281, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.procs.2021.12.240.

[165] S. A. Abdel Hakeem und H. Kim, „Authentication and encryption protocol with revocation and reputation management for enhancing 5G-V2X security“, *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, Bd. 35, Nr. 7, S. 101638, Juli 2023, doi: 10.1016/j.jksuci.2023.101638.

[166] G. Twardokus und H. Rahbari, „Vehicle-to-Nothing? Securing C-V2X Against Protocol-Aware DoS Attacks“, in *IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications*, Mai 2022, S. 1629–1638. doi: 10.1109/INFOCOM48880.2022.9796667.

[167] „Denial-of-Service Attacks on C-V2X Networks“, NDSS Symposium. Zugegriffen: 30. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ndss-symposium.org/ndss-paper/auto-draft-118/

[168] A. Boström und F. Wotawa, „Wireless Threats Against V2X Communication“, in *2023 IEEE 23rd International Conference on Software Quality, Reliability, and Security (QRS)*, Chiang Mai, Thailand: IEEE, Okt. 2023, S. 529–540. doi: 10.1109/QRS60937.2023.00058.

[169] M. R. Dey und M. Patra, „Hand it Over Carefully: Security Breach during Handover in 5G-V2X“, in *2023 15th International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS)*, Jan. 2023, S. 360–363. doi: 10.1109/COMSNETS56262.2023.10041381.

[170] F. Ahmad, A. Adnane, V. N. L. Franqueira, F. Kurugollu, und L. Liu, „Man-In-The-Middle Attacks in Vehicular Ad-Hoc Networks: Evaluating the Impact of Attackers' Strategies“, *Sensors*, Bd. 18, Nr. 11, S. 4040, Nov. 2018, doi: 10.3390/s18114040.

[171] M. N.-E. Saulaiman, M. Kozlovszky, und Á. Csilling, „A Survey on Vulnerabilities and Classification of Cyber-Attacks on 5G-V2X“, in *2021 IEEE 21st International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*, Nov. 2021, S. 000235–000240. doi: 10.1109/CINTI53070.2021.9668440.

[172] S. Aurangzeb, M. Aleem, M. T. Khan, H. Anwar, und M. S. Siddique, „Cybersecurity for autonomous vehicles against malware attacks in smart-cities“, *Clust. Comput.*, Bd. 27, Nr. 3, S. 3363–3378, Juni 2024, doi: 10.1007/s10586-023-04114-7.

[173] H. Aliev, H. Kim, und S. Choi, „A Scalable and Secure Group Key Management Method for Secure V2V Communication“, *Sensors*, Bd. 20, Nr. 21, S. 6137, Okt. 2020, doi: 10.3390/s20216137.

[174] A. Hbaieb, S. Ayed, und L. Chaari, „A survey of trust management in the Internet of Vehicles“, *Comput. Netw.*, Bd. 203, S. 108558, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.comnet.2021.108558.

[175] „Experiment programme for automated vehicles | Mobilité autonome“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sam-evra.fr/en

[176] M. van I. en Waterstaat, „Self-driving vehicles - Mobility, public transport and road safety - Government.nl“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.government.nl/topics/mobility-public-transport-and-road-safety/self-driving-vehicles

[177] R. says, „Traffic management sensor innovations: the Dutch experience“, Intelligent Transport. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.intelligenttransport.com/transport-articles/67329/traffic-management-sensor-innovation/

[178] „Drive Me, the world’s most ambitious and advanced public autonomous driving experiment, starts today“. Zugegriffen: 29. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/196240/drive-me-the-worlds-most-ambitious-and-advanced-public-autonomous-driving-experiment-starts-today

[179] „Testing Long-Term Evolution Vehicle-to-Everything (LTE-V2X) Radio Performance Capabilities within the 5.9 GHz Safety Band | US Department of Transportation“. Zugegriffen: 30. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.transportation.gov/V2XTestSummary

[180] B. für S. ASTRA, „Erkenntnisse aus Pilotversuchen mit automatisierten Fahrzeugen“. Zugegriffen: 25. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/intelligente-mobilitaet/pilotversuche/erkenntnisse-aus-pilotversuchen.html

[181] Swisscom AG, „Erfahrungsbericht Das erste selbstfahrende Auto auf Schweizer Strassen“, Nov. 2015.

[182] „Swiss Transit Lab Projekt - Linie 13“. Zugegriffen: 31. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.swisstransitlab.ch/de/projekte/linie-13/

[183] „Home - LOXO“. Zugegriffen: 31. Juli 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.loxo.ch/en/

[184] H. L. Y. W. P. C. B. Z. G. Yu, „A review on cooperative perception and control supported infrastructure-vehicle system“, *Green Energy Intell. Transp.*, Nr. 1, S. 100023, 2022.

[185] H. Cho, „Operational Design Domain (ODD) framework for driver-automation integrated systems“, Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2020. Zugegriffen: 20. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/129156

[186] M. Haberl und M. Fellendorf, „Emissionsoptimierte Lichtsignalsteuerung und Beeinflussung des Fahrverhaltens.“, 2015.

[187] ERTRAC Working Group „Connectivity and Automated Driving“, „Connected Automated Driving Roadmap“, European Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC), Brussels, Roadmap, März 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ertrac.org

Verwendung von KI

Für die Zusammenfassung wurde Chat GTP 5 von Open AI und Microsoft Copilot unterstützend verwendet. Als Tools zur Erstellung von Inhalten können sie unter anderem lange Textpassagen zusammenfassen und die wichtigsten Aspekte hervorheben. Die zugrunde liegenden Daten und Inhalte aus Quellen wurden von Hand ausgewählt und überprüft. Die Unterstützung von Deepl wurde verwendet, um die Zusammenfassung auf Französisch und Englisch zu übersetzen.

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: 18.8.2025

Grunddaten

Projekt-Nr.: MB4_20_05E_01

Projekttitel: Mindestanforderungen an die Infrastruktur für vernetzte, bedingt- und hochautomatisierte Fahrzeuge

Enddatum: 18.08.2025

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Infrastrukturanforderungen für automatisierte Fahrzeuge in der Schweiz:
Die Einführung automatisierter Fahrzeuge der SAE-Stufen 3 und 4 wird in der Schweiz in den nächsten zehn Jahren erwartet. Während rechtliche Grundlagen im Aufbau sind, bleibt offen, ob die bestehende Infrastruktur ausreicht oder angepasst werden muss. Die Studie untersucht, ob Fahrzeuge sich der Infrastruktur anpassen sollen oder umgekehrt und abhängig von den jeweiligen Betriebsumgebungen (ODD), welche physischen, sowie digitalen Komponenten dafür notwendig sind?
In vier Schritten wurden Literaturrecherche, ODD-Definition, V2X-Kommunikation und Mindestanforderungen analysiert. Die Sensorik umfasst Kamera, LiDAR, Radar, GPS u.a., wobei Einschränkungen bei Wetter und Rechenleistung auffallen. Die Kommunikation (V2V, V2I, V2P) muss Mischverkehr unterstützen und bietet auch für nicht-automatisierten Verkehr Vorteile. Zwei Szenarien wurden entwickelt:
- Maximale Vernetzung mit umfassender V2X-Kommunikation, hoher Sicherheit und Effizienz, aber großem Investitionsbedarf.
- Minimale Vernetzung mit markeninternen Systemen und geringeren Synergien.

Die Mindestanforderungen betreffen:
- Sicherheit: Maschinenlesbare Markierungen, Redundanz, Barrierefreiheit.
- Technik: Flächendeckende V2X-Infrastruktur, Sensorfusion, Edge Computing.
- Betrieb: Echtzeitdaten, standardisierte Wartung, Interoperabilität.

Erforderlich sind Digitalisierung, Cybersicherheitsarchitektur und ein Übergangsmanagement für Mischverkehr. Die Infrastruktur muss als Ermöglicher und Optimierer fungieren.
Weitere Forschungsfelder sind Interoperabilität undStandardisierung, Datenschutz, Geschäftsmodelle, Resilienz und Cybersicherheit, sowie eine Technologiebeurteilung im Kontext Mischbetrieb.

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3 — Seite 1 / 3

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Grundsätzlichen Ansprüche von vernetzten, bedingt- und hochautomatisierten Fahrzeugen an die Infrastruktur klären. Ist erfolgt.
Eigenschaften der OODs für den inner- als auch ausserstädtischen Bereich definieren. Ist erfolgt mit dem Resultat, dass sich die ODD's zu wenig differenzieren lassen.
Fahrzeug und Sensorik klassifiziert. Ist erfolgt.
Mindestanforderungen an die Infrastruktur ableiten. Ist erfolgt.
Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen Grundlagen für entsprechende Entscheidungsprozesse und Kostenabschätzungen der Behörden liefern. Ist erfolgt (Kapitel 6)
Sollen sich automatisierte Fahrzeuge an die bestehende Infrastruktur anpassen sollen oder soll die Strasseninfrastruktur an die Anforderungen der automatisierten Fahrzeuge angepasst werden. Ist erfolgt, für die Realisierung von Szeanrio 1 braucht es den Ausbau auf ISAD Level A.
Was müssen die Fahrzeuge können, um in den verschiedenen Infrastrukturen sicher unterwegs sein zu können. Ist erfolgt, Fahrzeuge müssen innerhalb der definierten ODD fahren können. Verlassen sie die ODD muss der Fahrer übernehmen oder das Fz begibt sich in einen sicheren Stop.
Szenario I beinhaltet eine maxi-male Vernetzung von Fahrzeugen mit der Verkehrsinfrastruktur. Wurde beschrieben.
Szenario II minimale Vernetzung der Fahrzeuge innerhalb der gleichen Marke. Wurde beschrieben.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Mindestanforderungen an die Infrastruktur lassen sich in drei Teilbereiche unterteilen.
Der Teilbereich Sicherheit benötigt Maschinenlesbare Signalisation und Fahrbahnmarkierungen, Redundante Systeme (physisch + digital) und Barrierefreiheit für alle Verkehrsteilnehmergruppen.
Der Teilbereich Technik verwendet eine flächendeckende V2X-Kommunikationsinfrastruktur (RSU, mobile Netze), bedingt eine Sensorfusion durch Kombination unterschiedlicher Datenträger und verwendet Edge Computing für lokale, möglichst in Echtzeit erfolgende Datenverarbeitung.
Der Teilbereich Betrieb funktioniert mit einer Echtzeitdatenaktualisierung, verwendet standardisierte Wartungs- und Prüfprotokolle und erlaubt eine Interoperabilität zwischen Betreibern, Herstellern und Behörden.

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: van Linn Vorname: Andreas

Amt, Firma, Institut: Amstein + Walthert Progress AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

A. van Linn

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3 **Seite 2 / 3**

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

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Begleitkommission wurde in den Forschungsprozess eingebunden und lieferte in den abgehaltenen BK Meetings wertvolle Beiträge zum Gelingen des Forschungsberichtes. Es wurden 2 BK Meetings unter 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 wissenschaftlich fundierten Vorgehen, mittels einer Übersicht über den Stand der Forschung, mittels Experten Workshops und Befragungen wurde korrekt durchgeführt und lieferte fundierte Ergebnisse für die Bereiche Sicherheit, Technik und Betrieb der Infrastruktur. Die Umsetzung/Ertüchtigung der Infrastruktur wird grosse Investitionen (Zeit und Geld) bedingen. Zur Zeit bleibt es unklar, wer die benötigten Investitionen leisten soll.

weitergehender Forschungsbedarf:

- Interoperabilität & Standardisierung.
- Datenschutz & Datensouveränität, wem gehören die Fahrdaten, wer darf Daten für was verwenden?
- Neue Geschäftsmodelle im Bereich des CIT, Bechreibung von wirtschaftliche Anreizen.
- Resilienz & Cybersecurity.
- Übergangsszenarien im Mischverkehr entwickeln.

Einfluss auf Normenwerk:

V2X und V2V Kommunikation wird nur funktionieren, falls die Kommunikationsprotokolle vereinheitlicht/standardisiert werden. Momentan ist Richtlinie UN-Regelung Nr. 157 — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen des automatischen Spurhalteassistenzsystems (ALKS) [2021/389], die entscheidende Richtlinie.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Morel Vorname: Dominique

Amt, Firma, Institut: Axis Communications GmbH

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3 Seite 3 / 3