



# Übergänge zwischen Bereichen mit Mischverkehr und ausschliesslich automatisiertem Verkehr

**Transitions entre les zones de trafic mixte et les zones de  
trafic exclusivement automatisé**

**Transition zones between mixed traffic and fully automated  
traffic operations**

**EBP Schweiz AG**  
**Remo Baumberger**  
**Bettina Zahnd**  
**Laura Herten**

**TU München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik**  
**Dr.-Ing. Tanja Niels**  
**Dr.-Ing. Lisa Kessler**  
**Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger**

**Forschungsprojekt MB4\_20\_05B\_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Mobilität 4.0 (MB4)**

**September 2024**

**1776**

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)



# **Übergänge zwischen Bereichen mit Mischverkehr und ausschliesslich automatisiertem Verkehr**

**Transitions entre les zones de trafic mixte et les zones de  
trafic exclusivement automatisé**

**Transition zones between mixed traffic and fully automated  
traffic operations**

**EBP Schweiz AG  
Remo Baumberger  
Bettina Zahnd  
Laura Hertel**

**TU München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik  
Dr.-Ing. Tanja Niels  
Dr.-Ing. Lisa Kessler  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger**

**Forschungsprojekt MB4\_20\_05B\_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Mobilität 4.0**

**September 2024**

**1776**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Co-Projektleitung

Remo Baumberger  
Dr.-Ing. Tanja Niels

### Mitglieder

Bettina Zahnd  
Laura Hertzen  
Dr.-Ing. Lisa Kessler  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger

## Begleitkommission

### Präsident

Prof. Dr. Markus Hackenfort (ZHAW)

### Mitglieder

Dr. Markus Deublein (BFU)  
Prof. Marion Dörfel (BFH)  
Hauke Fehlberg (ASTRA)  
Prof. Dr. Ing. Martin Fellendorf (TU Graz)  
Bernhard Gerster (ehem. DTC)  
Benno Held (ARE)  
Paolo Maltese (ASTRA)  
Dr. Felix Rempe (BMW)  
Dr. Nadine Zurkinden (UZH)

## Antragsteller

Arbeitsgruppe Mobilität 4.0 (MB4)

## Bezugsquelle

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>15</b>
<b>Summary</b> .....	<b>23</b>
<b>1 Ausgangslage und Zielsetzung</b> .....	<b>29</b>
1.1 Problembeschreibung .....	29
1.2 Stand der Forschung.....	30
1.3 Forschungsvorhaben.....	33
<b>2 Abgrenzung, Definitionen und Annahmen</b> .....	<b>35</b>
2.1 Betrachtungshorizont .....	35
2.2 Automatisierung .....	35
2.3 Vernetzung .....	36
2.4 Flottendurchdringung .....	36
2.5 Aktivierung des Systems .....	37
2.6 Fahrverhalten.....	37
2.7 Sensortechnologie .....	38
2.8 Kontrollübergabe.....	38
2.9 Rückfallebene .....	39
<b>3 Typisierung der Übergangsbereiche</b> .....	<b>40</b>
3.1 Merkmale der Übergänge.....	40
3.2 Merkmalskombinationen .....	41
3.3 Auswahl für die weitere Betrachtung.....	42
<b>4 Analyse der räumlichen und zeitlichen Häufigkeit der Übergänge</b> .....	<b>43</b>
4.1 Vorgehensweise .....	43
4.2 Übergangstyp 1: Einfahren in die HLS.....	45
4.3 Übergangstyp 2: Verlassen der HLS.....	47
4.4 Übergangstyp 3: Aktivierung der Fahrstreifensteuerung.....	49
4.5 Übergangstyp 4: Wechsel des Verkehrszustandes .....	51
4.6 Übergangstyp 5: Witterungswechsel auf "schlecht".....	54
4.7 Übersicht Häufigkeit der Übergänge .....	58
<b>5 Anforderungen an Übergänge</b> .....	<b>59</b>
5.1 Grundlagen und wesentliche Aussagen.....	59
5.2 Übersicht abgeleitete Anforderungen.....	64
<b>6 Ableitung von Konzepten anhand der Betrachtung von Beispielabschnitten</b> .....	<b>66</b>
6.1 Vorgehensweise .....	66
6.2 Übergangstyp 1: Einfahren in die HLS.....	70
6.2.1 Ausgangslage .....	70
6.2.2 Mögliche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb .....	75
6.3 Übergangstyp 2: Verlassen der HLS.....	77
6.3.1 Ausgangslage .....	77
6.3.2 Mögliche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb .....	80
6.4 Übergangstyp 3: Aktivierung der Fahrstreifensteuerung.....	82
6.4.1 Ausgangslage .....	83
6.4.2 Mögliche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb .....	89
6.5 Übergangstyp 4: Wechsel des Verkehrszustandes .....	91
6.5.1 Ausgangslage .....	91

6.5.2	Mögliche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb.....	97
6.6	Übergangstyp 5: Witterungswechsel auf "schlecht".....	98
6.6.1	Ausgangslage .....	99
6.6.2	Mögliche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb.....	104
6.7	Verfügbarkeit von Pannestreifen auf dem Nationalstrassennetz.....	106
<b>7</b>	<b>Erkenntnisse und Folgerungen für die Regulierung .....</b>	<b>108</b>
7.1	Erkenntnisse aus den erarbeiteten Konzepten.....	108
7.2	Anforderungen an die Datenübertragung .....	109
7.3	Anpassungsbedarf Regulierung.....	110
<b>8</b>	<b>Fazit und Empfehlungen .....</b>	<b>113</b>
	<b>Glossar und verwendete Abkürzungen.....</b>	<b>117</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>119</b>
	<b>Projektabschluss.....</b>	<b>123</b>

# Zusammenfassung

## Ausgangslage und Zielsetzung

Das automatisierte Fahren als Teil der Digitalisierung in Mobilität und Verkehr wird früher oder später kommen. Unter dieser Prämisse bereiten sich viele Akteure auf das automatisierte Fahren vor und versuchen, dieses möglichst im Sinne ihrer Ziele zu gestalten. Denn durch die permanente oder temporäre Übergabe der Fahrzeuglenkung vom Menschen an ein System bestehen verschiedene Chancen, die es zu nutzen gilt. Aus Sicht der öffentlichen Hand in der Schweiz sind dies insbesondere der Effizienzgewinn, die erhöhte Verkehrssicherheit, neue Möglichkeiten zur Vernetzung sowie Verkehrssteuerung oder die flexiblere Kombination von öffentlichen und privaten Transportleistungen. Doch es bestehen auch Risiken wie zwischenzeitliche Sicherheitsverluste, die erhöhte Verkehrsnachfrage oder eine starke Zunahme des Organisationsbedarfs im Strassenraum.

Unter der Annahme, dass aufgrund der geringeren Betriebskomplexität zuerst die Hochleistungsstrassen (HLS) für hoch- bzw. vollautomatisierte Fahrzeuge nutzbar gemacht werden, rücken die Übergänge auf den HLS in den Fokus. Übergänge werden dabei als Wechsel zwischen konventionellem Verkehr und Mischverkehr sowie zwischen Mischverkehr und ausschliesslich automatisiertem Verkehr verstanden. Diese sind bisher für die Schweiz nicht konkretisiert – sowohl in Bezug auf die Gestaltung (Infrastruktur mit allen baulichen Elementen) als auch auf den Betrieb (Steuerung, Lenkung, Abwicklung inkl. dafür benötigte Ausstattung).

Die vorliegende Forschungsarbeit behandelt verschiedene Fragestellungen:

- Welche massgeblichen Kriterien definieren die Übergänge zwischen dem konventionellen Verkehr und Mischverkehr sowie zwischen Mischverkehr und ausschliesslich automatisiertem Verkehr (Stichwort operational design domain, ODD)?
- Wo, wann und in welcher Häufigkeit treten diese Übergänge – unter Berücksichtigung der Zukunftsszenarien zum automatisierten Fahren für den Personen- und Güterverkehr auf der Strasse – in der Schweiz auf? Welche Herausforderungen bestehen dazu in diesen Übergängen heute?
- Welche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb sind für die Übergänge hinsichtlich Einführung des automatisierten Fahrens denkbar?
- Welche Folgen haben diese Konzepte auf Verkehrsfluss (Kapazität) und Verkehrssicherheit? Welche Konzepte sind unter Berücksichtigung der Schweizer Gegebenheiten (hohe Anschlussdichte, beengte Platzverhältnisse, Wetter) zu verwerfen?
- Welche Prinzipien können für die Gestaltung und den Betrieb abgeleitet werden? Welcher Ergänzungs- und Anpassungsbedarf entsteht in der Regulierung?

## Definitionen und Untersuchungsabgrenzung

Es wird der Zeitraum bis 2050 betrachtet. Das Forschungsvorhaben konzentriert sich im Wesentlichen auf hochautomatisiertes Fahren (Stufe 4) im Mischverkehr. Auf einzelnen Fahrstreifen auf ausgewählten Strecken ist auch vollständig hochautomatisiertes Fahren denkbar. Aus der Definition des hochautomatisierten Fahrens ergibt sich, dass das Fahrzeug zunächst nur auf bestimmten Strassentypen automatisiert fahren kann. Dementsprechend werden Übergaben der Fahraufgabe nötig. Gemäss Forschungsprojekt ASTRA 2018/005 [16] wird für das Jahr 2050 im Personenverkehr von rund 30% (Trendszenario) bis 60% (festgelegtes Extremszenario) automatisierten Fahrzeuge der Stufe 4 an der Gesamtflotte ausgegangen. Im Güterverkehr sind die Anteile geringfügig grösser.

Um die Unsicherheiten und die Bandbreite potenzieller zukünftiger Entwicklungen bei der Vernetzung aufzuzeigen wurden zwei Fälle betrachtet:

1. Starker (öffentlicher) Datenverbund: Hierbei handelt es sich um eine staatlich organisierte und reglementierte Vernetzung der Fahrzeuge mit der Infrastruktur, die

weitgehend die öffentlichen Interessen sowie die Perspektive der Eigentümer und Betreiber abbildet. Dabei wird eine umfassende Integration von Vehicle-to-Infrastructure (V2I) angestrebt.

2. Lösung auf Fahrzeug- oder Herstellerebene: Diese Vernetzung wird von den Fahrzeugherstellern oder -betreibern organisiert. Es erfolgt keine umfassende Vernetzung mit der Infrastruktur (V2I).

## Typisierung der Übergangsbereiche

Eine Häufung von Übergängen wird dort erwartet, wo die technischen Grenzen für eine Vielzahl von Automatisierungsfunktionen erreicht sind oder der zugelassene bzw. reglementierte Betriebsbereich beginnt oder endet. Die vom automatisierten Fahrzeug zu erkennenden Betriebsbedingungen der sogenannten Operational Design Domain (ODD) umfassen Niederschlag (Regen, Schnee), Tageszeit, Lichtintensität, Nebel, Strassen- und Fahrbahnmarkierungen, Strassenkategorien und den geografischen Bereich. Die wesentlichen Merkmale für die Übergänge können in die Aspekte "Infrastruktur", "Steuerung" und "dynamische Aspekte" unterteilt und weiter differenziert werden.

Auf Basis der Literaturrecherche wurden einige als für die ODD weniger relevant eingestufte Faktoren (z.B. das Vorhandensein von Brücken) sowie in der Schweiz sehr selten auftretende Faktoren (z.B. schlechte Strassenmarkierungen) und unrealistische Kombinationen ausgeschlossen. Nach sorgfältiger Berücksichtigung der voraussichtlichen Kritikalität und Häufigkeit der verschiedenen Übergangsbereiche wurden die folgenden fünf Übergänge für die detaillierte Betrachtung ausgewählt:

1. Einfahren in die HLS, da eine hohe Häufigkeit erwartet wird
2. Verlassen der HLS, da eine hohe Häufigkeit erwartet wird und besonders kritische Szenarien vorhanden sind
3. Aktivierung der Fahrstreifensteuerung, da damit verbundene Fragen zu beschränkten Fahrstreifennutzungen von besonderem Interesse sind
4. Wechsel des Verkehrszustandes, da damit verbundene Fragen zur allfälligen Übergabepflicht von besonderem Interesse sind
5. Witterungswechsel auf "schlecht", da grosse Risiken bestehen

## Analyse der räumlichen und zeitlichen Häufigkeit der Übergänge

Die Anzahl der Übergänge pro Tag oder pro Jahr wurden für den Kontext der Schweiz ermittelt. Dabei wurde sowohl die zeitliche Verteilung über den Tag und das Jahr als auch die räumliche Verbreitung dieser Übergänge untersucht. Zur Abschätzung der Häufigkeit wurden vereinfachende Annahmen getroffen:

- Unmittelbar nach Einfahrt auf die Autobahn aktivieren 30% der hochautomatisierten Fahrzeuge die automatisierten Fahrfunktionen (AF)
- Bei entsprechender Fahrstreifenfreigabe aktivieren zusätzliche 30% die AF.
- Bei sehr dichtem Verkehr (nahe der Kapazitätsgrenze, z.B. im Stau) aktivieren zusätzliche 40% die AF.
- Bei Wetterwechsel auf "schlecht" (Sensorik kann das Fahrzeug unter Umständen nicht mehr allein steuern) fahren 50% der hochautomatisierten Fahrzeuge automatisiert, die dann an die manuelle Steuerung zurückübergeben.
- Unmittelbar vor Verlassen der Autobahn fahren 40% automatisiert, die dann auf manuelle Steuerung wechseln.

Aufgrund der Unsicherheiten wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der zwei unterschiedliche Durchdringungsgrade von automatisierten Fahrzeugen (Szenario 1 mit 30% und Szenario 2 mit 60%) analysiert werden. Zudem wird neben dem oben beschriebenen Aktivierungsverhalten ("Normalszenario") ein zweites Szenario betrachtet ("Extremszenario"), in dem alle hochautomatisierten Fahrzeuge jeweils die AF auf HLS aktivieren. Als Datenbasis werden das Nationale Personenverkehrsmodell (NPVM), die Angaben des Bundes zur Engpassbeseitigung auf dem Nationalstrassennetz, die Staudaten des ASTRA sowie Wetterdaten von Meteo-Schweiz verwendet. Die Übergänge werden sowohl räumlich als auch zeitlich beschrieben. Zusammenfassend lässt sich das Resultat der geschätzten Anzahl an Übergängen in der Schweiz gemäss Abb. 1 festhalten.

Bei allen Werten handelt es sich um Mittelwerte. Bei den Übergangstypen 1-4 ist die Streuung geringer als beim Übergangstyp 5, bei dem im Mittelwert auch Tage ohne Schlechtwetterereignisse abgebildet sind.

		Summe Übergaben pro Tag			
		Szenario 1: Durchdringungsrate von 30%		Szenario 2: Durchdringungsrate von 60%	
		Normalszenario	Extremszenario: 100 % Aktivierung auf der HLS	Normalszenario	Extremszenario: 100 % Aktivierung auf der HLS
1.	<b>Einfahren in die HLS</b> 	335'000	1'120'000	670'000	2'233'000
2.	<b>Verlassen der HLS</b> 	450'000	1'125'000	900'000	2'250'000
3.	<b>Aktivierung Fahrstreifensteuerung</b> 	195'000	0	390'000	0
4.	<b>Wechsel Verkehrszustand auf Kapazitätsbereich/Stau</b> 	18'500	0	36'900	0
5.	<b>Witterungswechsel auf «schlecht»</b> 	105	210	210	420

**Abb. 1** Übersicht Häufigkeit der Übergänge

## Anforderungen an Übergänge

Anforderungen an das Verkehrssystem können nicht nur fachlich hergeleitet werden. Viele bzw. die meisten Aspekte gehen auf Werte und Normen zurück, die letztlich durch die Gesellschaft und die Politik festzulegen sind. Eine Leitschnur bilden Strategiedokumente der zuständigen Departemente und Ämter des Bundes. Diese wurden ausgewertet.

Aus den Grundlagen gehen vielfältige Anforderungen an das Verkehrssystem hervor, die teilweise unabhängig vom automatisierten Fahren sind. Das automatisierte Fahren in der Schweiz hat diese Anforderungen des Bundes möglichst gut abzudecken. Diese sind:

1. Objektive Verkehrssicherheit: Heutige Unfallzahlen sinken.  
*Grössenordnung bis 2030: Abnahme um ca. 50% (Verkehrstote) bzw. ca. 40% (Schwerverletzte)*
2. Die subjektive Verkehrssicherheit ist angemessen.
3. Verkehrsfluss: Die Stauzustände nehmen gegenüber heute ab.  
*Grössenordnung bis 2030: Abnahme um ca. 25%*
4. Automatisierte Fahrzeuge werden so genutzt, dass die Kapazitäten der Infrastrukturen erhöht werden.
5. Der Datenaustausch und die Vernetzung sind gegenüber heute erhöht.
6. Die Streckenausrüstung ist minimiert in Bezug auf die Gesamtkosten.
7. Verkehrsinfrastrukturen werden flächenschonend realisiert.

Eine Gewichtung bzw. Priorisierung der aufgeführten Anforderungen kann aus den vorhandenen Grundlagen nicht abgeleitet werden. Dementsprechend sind alle Anforderungen möglichst gut abzudecken.

## Betrachtung von Beispielabschnitten

Mit der Betrachtung von Beispielabschnitten wurden für die fünf Übergangstypen eine Analyse und Beschreibung der heutigen Ausgangslage betreffend Verkehrsfluss und Verkehrssicherheit exemplarisch durchgeführt. Ausgehend von der heutigen Situation wurden für die betrachteten Übergangstypen Konzepte entwickelt, wie diese gestaltet (Infrastruktur, Ausstattung) und betrieben (Steuerung, auch über Vernetzung) werden können. Die entwickelten Konzepte wurden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die objektive und subjektive Verkehrssicherheit und auf den Verkehrsfluss beurteilt.

### Übergang 1: Einfahren in die HLS

Der Beispielabschnitt zur Einfahrt am Anschluss an die N1 in Dietikon weist heute eine hohe Verkehrsbelastung, ausgeprägte Verkehrsspitzen und instabile Zustände (in 4.5%

der betrachteten Zeitfenster) auf. Die aus Sicherheitsgründen erforderlichen minimalen Folgezeitlücken werden oft unterschritten, die zulässige Geschwindigkeit auf der Stammstrecke oft überschritten. Das Einfahren in die HLS ist kein Schwerpunkt im registrierten Unfallgeschehen. Die häufigen Auffahrkollisionen auf den Überholstreifen dominieren das Unfallgeschehen im betrachteten Abschnitt.

Im erarbeiteten Konzept wird der Fahrer/die Fahrerin vor der Einfahrt auf die HLS darauf hingewiesen, dass die Steuerung an das Fahrzeug abgegeben werden kann. Sobald die Voraussetzungen bzgl. des notwendigen Abstands zum Vorderfahrzeug und bzgl. Einhaltung Geschwindigkeitsbeschränkung erfüllt sind, erfolgt die Übertragung der Steuerung innerhalb von Sekundenbruchteilen. Die Sensorik überwacht während dieses Prozesses kontinuierlich die Umgebung. Nach der Kontrollübernahme beschleunigt das Fahrzeug, um die gleiche Geschwindigkeit wie auf der Hauptstrecke zu erreichen. Wenn das Ramp Metering (Dosierung der Auffahrtsrampe) aktiv ist, passt das Fahrzeug die Geschwindigkeit entsprechend optimal an. Gleichzeitig kooperiert das Fahrzeug mit anderen automatisierten Fahrzeugen.

### **Übergang 2: Verlassen der HLS**

Der Beispielabschnitt zur Ausfahrt am Anschluss an die N1 in Dietikon weist – wie der Beispielabschnitt zum Einfahren in die HLS – instabile Zustände (in 4.5% der betrachteten Zeitfenster) und ausgeprägte Verkehrsspitzen auf. Die aus Sicherheitsgründen erforderlichen minimalen Folgezeitlücken werden oft erheblich unterschritten, die zulässige Geschwindigkeit auf der Stammstrecke oft überschritten. Die Unfälle auf der Ausfahrt sind mehrheitlich Selbst- oder Schleuderunfälle und werden insbesondere durch nicht-angepasste Geschwindigkeiten bei Regen verursacht.

Im erarbeiteten Konzept erfolgt spätestens 40 Sekunden vor Erreichen der Ausfahrtsrampe die Aufforderung zur Übernahme durch den Fahrer/die Fahrerin. Zu diesem Zeitpunkt muss das Fahrzeug bereits auf den rechten Fahrstreifen gewechselt haben und einen ausreichenden Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhalten, sodass der Fahrer/die Fahrerin die Kontrolle ohne grössere Herausforderungen übernehmen kann. Im Zusammenhang mit der Aufforderung zur Kontrollübernahme werden die möglichen Nebenaktivitäten für den Fahrer/die Fahrerin eingeschränkt, bspw. durch Geradestellen der Sitzlehne. Zudem erfolgt eine geringfügige Geschwindigkeitsreduzierung (von 120 auf 100 km/h). Die Übernahme durch den Fahrer/die Fahrerin muss vor Erreichen der Ausfahrtsrampe erfolgen. Um hektische Fahrmanöver zu vermeiden, könnte die Übernahmefunktion auf Höhe der Ausfahrt (an der durchgezogenen Linie) blockiert werden. Falls der Fahrer/die Fahrerin nicht reagiert, wechselt das Fahrzeug nicht auf die Ausfahrtsrampe, sondern fährt über die Anschlussstelle hinaus und wartet erneut auf eine Übernahme. Bei fortwährender Nichtreaktion des Fahrers/der Fahrerin wird von einem medizinischen Notfall ausgegangen. Das Fahrzeug lenkt in diesem Fall auf den Pannestreifen, wo es die Rückfallebene aktiviert.

### **Übergang 3: Aktivierung der Fahrstreifensteuerung**

Der Beispielabschnitt "Melide/Bissone – Mendrisio" auf der N2 weist in Richtung Norden einige instabile Verkehrszustände auf (3.3% der betrachteten Zeitfenster) und ausgeprägte Belastungsspitzen am Wochenende auf. Während die aus Sicherheitsgründen erforderlichen minimalen Folgezeitlücken oft unterschritten werden, wird die zulässige Geschwindigkeit kaum überschritten. Die Unfallanalyse zeigt, dass auf diesem Abschnitt neben den Schleuder- und Selbstunfällen sowie den Auffahrkollisionen insbesondere auch die Überholunfälle und Unfälle beim Fahrstreifenwechsel relativ häufig polizeilich registriert werden. Mangelnde Rücksichtnahme beim Fahrstreifenwechsel und zu nahes Aufschliessen als häufige Unfallursachen zeigen die Herausforderung auf diesem Abschnitt.

Im erarbeiteten Konzept teilt im Fall 1 eines starken Datenverbunds die Infrastruktur Informationen über den Sonderbetrieb des Fahrstreifens. Das Fahrzeug gibt basierend auf der geplanten Route und der daraus resultierenden Distanz zur relevanten Ausfahrt von der HLS eine Empfehlung ab, ob die Nutzung des zusätzlichen Fahrstreifens sinnvoll ist. Im Fall 2 wird der Betrieb des Fahrstreifens durch Signale, Markierungen, LED-Anzeigen

auf dem Boden oder überkopf angezeigt und durch das Fahrzeug erkannt. In beiden Fällen weist das Fahrzeug den Fahrer/die Fahrerin auf die Möglichkeit der Kontrollübergabe zur Nutzung des zusätzlichen Fahrstreifens hin. Sobald die Voraussetzungen bzgl. des notwendigen Abstands zum Vorderfahrzeug und bzgl. Einhaltung Geschwindigkeitsbeschränkung erfüllt sind, erfolgt die Übertragung der Steuerung innerhalb von Sekundenbruchteilen. Die Sensorik überwacht während dieses Prozesses kontinuierlich die Umgebung. Nach der Kontrollübernahme wechselt das Fahrzeug sobald möglich auf den zusätzlichen Fahrstreifen. Eine Signalisation des Fahrstreifens ist notwendig, um deutlich zu machen, dass der Fahrstreifen nicht von nicht-automatisierten Fahrzeugen genutzt werden darf. Trotz Nutzungsbeschränkung auf dem zusätzlichen Fahrstreifen müssen nicht-automatisierte Fahrzeuge auf dem Nachbarfahrstreifen beobachtet und ihr Verhalten prognostiziert werden, um die Sicherheit zu gewährleisten. Im Pannenfalle auf dem Sonderfahrstreifen wird der Fahrstreifen für alle Fahrzeuge gesperrt.

#### **Übergang 4: Wechsel des Verkehrszustandes**

Der Beispielabschnitt "Buchrain – Rotsee" auf der N14 weist einen besonders hohen Anteil an instabilen Verkehrszuständen (10.4% in Fahrtrichtung Rotsee) und ausgeprägte Belastungsspitzen am Morgen und Abend auf. Während die aus Sicherheitsgründen erforderlichen minimalen Folgezeitlücken oft unterschritten werden, wird die zulässige Geschwindigkeit kaum überschritten. Die Analyse der Unfälle zeigt insbesondere das grosse Potential, welches das automatisierte Fahren für die Sicherheit bei starkem Verkehrsaufkommen und stockendem Verkehr hat. Auffahrkollisionen aufgrund von zu nahem Aufschliessen können dank Technik verhindert werden.

Das erarbeitete Konzept baut auf diesen Erkenntnissen zum heutigen Zustand auf. Der Übergang vom Mischverkehr zu automatisierter Steuerung ist erwartbar, aber temporär. Der Fahrer/die Fahrerin gibt die Steuerung ab und erhält dafür Anreize, beispielsweise durch direkte Bonuspunkte bei der Fahrzeugzulassungsstelle oder durch Vorteile beim Kauf eines Fahrzeugs, mit dem man sich für eine Abgabe der Steuerung in kritischen Bereichen verbindlich einverstanden erklärt. Die Steuerungsabgabe kann innerhalb von Sekundenbruchteilen erfolgen, sofern die Randbedingungen wie Geschwindigkeit oder Folgezeitlücken eingehalten sind. Eine wesentliche Voraussetzung zur Anwendung sind hochaufgelöste Daten zu Zonen mit kritischem Verkehrszustand wie etwa das Erreichen eines definierten Geschwindigkeitsgrenzwerts. Etwa 10 Sekunden vor dem Einfahren in den kritischen Bereich erfolgt eine Empfehlung zur Übergabe an den Fahrer/die Fahrerin. Nicht-automatisierte Fahrzeuge müssen während der Übergabe beobachtet und ihr Verhalten prognostiziert werden.

#### **Übergang 5: Witterungswechsel auf "schlecht"**

Der Beispielabschnitt "Sion-Est – Sierre-Ouest" auf der N9 liegt im Alpenraum. Auf dem Abschnitt werden die aus Sicherheitsgründen erforderlichen minimalen Folgezeitlücken oft unterschritten, zudem wird die zulässige Geschwindigkeit besonders häufig überschritten. Instabile Verkehrszustände sind praktisch nicht vorhanden, auch bei hoher Niederschlagsintensität bleibt der Verkehrszustand stabil. Die gefahrenen Geschwindigkeiten sind hingegen bei diesen Ereignissen deutlich reduziert. Die Analyse der aufgezeichneten Unfälle bestätigt, dass bei Schlechtwetter ein grosser Anteil an Schleuder- und Selbstunfälle vorhanden ist.

Der Übergang ist erforderlich, da ein (Teil-)Wegfall der Sensorik erfolgen könnte. Im erarbeiteten Konzept erfolgt etwa 40 Sekunden vor dem Erreichen der kritischen Zone die Übernahmeaufforderung an den Fahrer/die Fahrerin. Mögliche Nebenaktivitäten werden eingeschränkt (Stopp einer Filmwiedergabe, Aufrichten der Sitzposition etc.). Vor Einfahrt in die Schlechtwetterzone wird die Geschwindigkeit des Fahrzeugs stark reduziert (auf beispielsweise 40 km/h). Ohne eine Reaktion des Fahrers/der Fahrerin erfolgt 20 Sekunden vor Erreichen der kritischen Zone eine Warnung und der Hinweis, dass das Fahrzeug im Falle der Nichtübernahme abgestellt wird. Auf Basis der Pannestreifenbelegung, die als Information an das Fahrzeug übermittelt wird, kann somit ein Fahrstreifenwechsel eingeleitet werden und die Geschwindigkeit so weit reduziert werden, dass die Abstellposition (bspw. Pannestreifen) erreicht wird (Rückfallebene).

## Erkenntnisse

Die Folgen der Konzepte auf die objektive sowie subjektive Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss (Verkehrskapazität, Zuverlässigkeit) wurden durch das Projektteam qualitativ abgeschätzt. Die Resultate zeigen auf, dass bei den betrachteten Übergängen meist eine Verbesserung, jedoch nie eine Verschlechterung gegenüber der heutigen Situation eintreten dürfte. Sowohl die Verkehrssicherheit als auch der Verkehrsfluss profitieren in der Regel von den erarbeiteten Konzepten.

Die Folgen der Konzepte unterscheiden sich je nach Modell der Datenübertragung. Mit einem starken (öffentlichen) Datenverbund werden oft bessere Wirkungen bzgl. Verkehrssicherheit und Verkehrsfluss erreicht. Gründe sind die bessere Verfügbarkeit bzw. Bündelung von Informationen sowie die stärkere Berücksichtigung der systemischen Infrastrukturbetreibersicht. Wird der Datenaustausch auf der Ebene Fahrzeuge/Hersteller organisiert, dürfte ein geringes Interesse zur Optimierung des Strassenbetriebs bestehen.

Den erarbeiteten Konzepten sind verschiedene Aspekte gemein. Alle gefundenen Konzepte weisen Betriebswechsellpunkte auf. Diese sind notwendig, um dem Fahrzeug bzw. dem System die Information zu geben, dass entweder vom automatisierten Betrieb auf das menschliche Steuern des Fahrzeuges umgestellt werden muss (unter Berücksichtigung der Übergangszeit) oder dass die Steuerung vom Menschen an das System abgegeben werden kann. Die Betriebswechsellpunkte sind örtlich festgelegt, jedoch unterscheidet sich je nach Übergangstyp die Zeitspanne (temporär oder fix).

Bei den Übergängen vom Mischverkehr zum konventionellen Verkehr ist in allen Konzepten ein Pannestreifen enthalten, der für das Erreichen des risikominimalen Zustandes notwendig ist. Darauf kann nicht verzichtet werden, wenn man auf die erarbeiteten Konzepte setzt. Zudem braucht es eine Rückfallebene (im Sinne eines Notrufs), der die Sicherheit für Menschen in automatisierten Fahrzeugen, die den risikominimalen Zustand erreichen, gewährleistet.

Bei den Übergängen vom Mischverkehr zum konventionellen Verkehr ist in allen Konzepten eine Reduktion der Geschwindigkeit für die automatisierten Fahrzeuge enthalten. Diese soll einerseits dazu dienen, den Anreiz zur Übernahme für die menschlichen Fahrer/innen zu erhöhen. Andererseits sollen Konflikte auf den Strassenabschnitten reduziert werden. Je nach Fall unterscheidet sich aber das Mass der Geschwindigkeitsreduktion. Ebenso ist in allen Konzepten bei den Übergängen vom Mischverkehr zum konventionellen Verkehr ein Wechsel der Sitzposition im Fahrzeug enthalten (v.a. Senkrechtstellen der Sitzlehne), der die Nebenaktivitäten im Fahrzeug einschränkt. Diese Massnahme scheint wichtig, um die Wahrscheinlichkeit einer Übernahme durch den Menschen zu erhöhen und die Notwendigkeit des Einleitens eines risikominimierenden Manövers, das trotzdem zu potenziellen Konflikten führen kann, zu reduzieren.

## Folgerungen für die Regulierung

Der Regulierungsbedarf baut auf der Inkraftsetzung der vorliegenden Teilrevision des Strassenverkehrsgesetzes (SVG) und der Vernehmlassungsvorlage der Verordnung zum automatisierten Fahren (AFV) auf. Der darin enthaltene Fahrmodusspeicher ist in erster Linie so definiert, dass dieser im Falle eines Unfalls dokumentiert, ob zum Unfallzeitpunkte der Fahrer bzw. die Fahrerin oder das Automatisierungssystem das Fahrzeug gesteuert hat. Es erfolgt keine kontinuierliche Speicherung von Daten und es sind keine Bestimmungen zur Vernetzung bzw. zum Datenaustausch in Echtzeit bzw. während der Fahrt enthalten.

Für den Fall eines starken (öffentlichen) Datenverbunds muss demnach der dafür notwendige Datenaustausch reguliert werden. Hierbei ist festzulegen, welche Daten in welcher Auflösung durch das Fahrzeug bereitzustellen sind und welche Daten empfangen sowie verarbeitet werden müssen. Andererseits muss reguliert werden, ob Informationen aus dem Datenaustausch im Fahrzeug gespeichert werden müssen und wenn ja, mit welchen Standards. Der Datenaustausch geht dabei deutlich über die bisher in der AFV

aufgeführten Anforderungen an den Fahrmodusspeicher hinaus, bspw. in Bezug auf das kontinuierliche Empfangen und Versenden von Daten oder die Erfassung und Verarbeitung von Umfelddaten (Meteorologie, Lichtintensität, Markierung etc.). Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden die für die Konzepte notwendigen Daten beschrieben und nach Kommunikationsweg (Datenempfang, Datenversand) und zeitlicher Auflösung gegliedert.

Auch die in den Übergangskonzepten enthaltene "Rückfallebene" ist rechtlich zu definieren. Die Rückfallebene wird aktiv, nachdem das Fahrzeug den risikominimalen Zustand erreicht hat (und beispielsweise auf einem Pannestreifen zum Stehen gekommen ist). Es ist denkbar, dass in diesem Fall die Verkehrsmanagementzentrale benachrichtigt werden muss, damit diese allfällige Massnahmen (bspw. Sperrung Pannestreifen oder Reduktion Höchstgeschwindigkeit auf dem Nationalstrassenabschnitt) einleiten kann. Zudem könnte der Notfalldienst der zuständigen Polizeibehörden eingeschaltet werden, wenn die Person im Fahrzeug der Übernahmeaufforderung nicht nachgekommen ist. Bei der Regulierung muss der Rahmen definiert werden, wie diese Kommunikation technisch erfolgt und wer für die Abwicklung entsprechender Meldungen zuständig ist.

Für den Fall einer Datenlösung auf Ebene Fahrzeuge/Hersteller müssen neue Signale für Betriebswechsellpunkte zur Steuerungsübergabe ans System bzw. an den Fahrer/die Fahrerin geschaffen werden. Diese Signale zeigen an, wo der Übergang vom automatisierten Fahren zum konventionellen Fahren startet bzw. wo eine Abgabe ans Automatisierungssystem erfolgen kann. Die Signale sind in der Signalisationsverordnung (SSV) zu verankern. Zusätzlich ist bei einer Realisierung des betrachteten Übergangskonzepts zur "Aktivierung der Fahrstreifensteuerung" eine neue Signalisation für Fahrstreifen notwendig, die nur von automatisierten Fahrzeugen befahren werden dürfen.



## Résumé

### Situation de départ et objectif

La conduite automatisée, faisant partie de la numérisation de la mobilité et des transports, arrivera tôt ou tard. Partant de cette prémisse, de nombreux acteurs se préparent à la conduite automatisée et tentent de l'organiser autant que possible dans le sens de leurs objectifs. En effet, le transfert permanent ou temporaire de la conduite des véhicules de l'homme à un système offre différentes opportunités qu'il convient d'exploiter. Du point de vue des pouvoirs publics suisses, il s'agit notamment d'un gain d'efficacité, d'une sécurité routière renforcée, de nouvelles possibilités de mise en réseau et de gestion du trafic ainsi que d'une plus grande flexibilité dans la combinaison des prestations de transport publiques et privées. Mais il existe également des risques tels que les pertes de sécurité intermédiaires, l'augmentation de la demande de transport ainsi qu'une forte augmentation des besoins d'organisation dans l'espace routier.

En supposant que les routes à grand débit (RGD) soient rendues utilisables en premier lieu par des véhicules hautement ou entièrement automatisés en raison de leur moindre complexité d'exploitation, les transitions sur les RGD font l'objet d'une attention particulière. Les transitions sont considérées comme des changements entre le trafic conventionnel et le trafic mixte, ainsi qu'entre le trafic mixte et le trafic exclusivement automatisé. Celles-ci n'ont pas encore été concrétisées pour la Suisse - tant en ce qui concerne l'aménagement (infrastructure avec tous les éléments de construction) que l'exploitation (commande, guidage, déroulement, y compris l'équipement nécessaire à cet effet). Le présent travail de recherche aborde différentes questions :

- Quels sont les critères déterminants qui définissent les transitions entre le trafic conventionnel et le trafic mixte ainsi qu'entre le trafic mixte et le trafic exclusivement automatisé (mot-clé Operational Design Domain, ODD) ?
- Où, quand et à quelle fréquence ces transitions se produisent-elles en Suisse, compte tenu des scénarios d'avenir concernant la conduite automatisée pour le transport routier de personnes et de marchandises ? Quels sont les défis actuels liés à ces transitions ?
- Quels concepts d'aménagement et d'exploitation sont envisageables pour les passages à niveau en vue de l'introduction de la conduite automatisée ?
- Quelles sont les conséquences de ces concepts sur la fluidité (capacité) et la sécurité du trafic ? Quels concepts doivent être abandonnés compte tenu des conditions en Suisse (densité élevée des correspondances, espace restreint, conditions météorologiques) ?
- Quels principes peuvent être déduits pour la conception et l'exploitation ? Quels sont les besoins complémentaires et d'adaptation qui apparaissent dans la réglementation ?

### Définitions et délimitation de l'enquête

La période considérée s'étend jusqu'en 2050. Le projet de recherche se concentre essentiellement sur la conduite hautement automatisée (niveau 4) en trafic mixte. La conduite hautement automatisée est également envisageable sur certaines voies de circulation sur des tronçons sélectionnés. La définition de la conduite hautement automatisée implique que le véhicule ne peut, dans un premier temps, rouler de manière automatisée que sur certains types de routes. En conséquence, des transferts de tâches de conduite sont nécessaires. Selon le projet de recherche OFROU 2018/005 [1616], on estime qu'en 2050, dans le transport de personnes, entre 30% (scénario tendanciel) et 60% (scénario extrême défini) de la flotte totale sera composée de véhicules automatisés de niveau 4. Dans le transport de marchandises, les proportions sont légèrement plus élevées.

Afin de mettre en évidence les incertitudes et l'éventail des développements futurs potentiels en matière d'interconnexion, deux cas de figure ont été envisagés :

1. Une forte interconnexion des données (publiques) : il s'agit d'une mise en réseau des véhicules avec les infrastructures, organisée et réglementée par l'État, qui reflète dans une large mesure les intérêts publics ainsi que la perspective des propriétaires et des exploitants. L'objectif est de parvenir à une intégration complète de Vehicle-to-Infrastructure (V2I).
2. Solution au niveau du véhicule ou du constructeur : cette mise en réseau est organisée par les constructeurs ou les exploitants de véhicules. Il n'y a pas de mise en réseau complète avec l'infrastructure (V2I).

## Typologie des zones de transition

On s'attend à une accumulation de transitions là où les limites techniques pour un grand nombre de fonctions d'automatisation sont atteintes ou lorsque le domaine d'exploitation autorisé ou réglementé commence ou se termine. Les conditions d'exploitation du domaine de conception opérationnelle (Operational Design Domain, ODD) à reconnaître par le véhicule automatisé comprennent les précipitations (pluie, neige), le moment de la journée, l'intensité lumineuse, le brouillard, le marquage des routes et des chaussées, les catégories de routes et la zone géographique. Les caractéristiques essentielles pour les transitions peuvent être divisées en aspects "infrastructure", "contrôle" et "aspects dynamiques" et être différenciées davantage.

Sur la base de la recherche bibliographique, certains facteurs considérés comme moins pertinents pour l'ODD (ex. la présence de ponts) ainsi que des facteurs très rarement rencontrés en Suisse (ex. un mauvais marquage des routes) et des combinaisons irréalistes ont été exclus. Après avoir soigneusement pris en compte la criticité et la fréquence probables des différentes zones de transition, les cinq passages suivants ont été sélectionnés pour une étude détaillée :

1. Entrer dans la RGD, car une fréquence élevée est attendue.
2. Quitter la RGD, car une fréquence élevée est attendue et des scénarios particulièrement critiques sont présents.
3. Activation du contrôle des voies de circulation, car les questions liées à l'utilisation limitée des voies de circulation sont particulièrement intéressantes.
4. Changement de l'état de la circulation, car les questions qui y sont liées concernant une éventuelle obligation de transfert sont particulièrement intéressantes.
5. Changement des conditions météorologiques en "mauvais", car il existe des risques importants.

## Analyse de la fréquence spatiale et temporelle des transitions

Le nombre de transitions par jour ou par an a été déterminé pour le contexte de la Suisse. La répartition temporelle sur la journée et l'année ainsi que la répartition spatiale de ces transitions ont été examinées. Des hypothèses simplifiées ont été utilisées pour estimer la fréquence :

- Immédiatement après l'entrée sur l'autoroute, 30% des véhicules hautement automatisés activent les fonctions de conduite automatisée (CA).
- Si la voie est libre, 30% supplémentaires activent les CA.
- En cas de trafic très dense (proche de la limite de capacité, par exemple en cas d'embouteillage), 40% supplémentaires activent les CA.
- En cas de changement de météo en "mauvais" (les capteurs ne peuvent éventuellement plus piloter le véhicule seuls), 50% des véhicules hautement automatisés roulent de manière automatisée, puis repassent au pilotage manuel.
- Juste avant de quitter l'autoroute, 40% roulent de manière automatisée et passent ensuite au pilotage manuel.

En raison des incertitudes, une analyse de sensibilité est effectuée en analysant deux niveaux différents de pénétration des véhicules automatisés (scénario 1 avec 30% et scénario 2 avec 60%). De plus, outre le comportement d'activation décrit ci-dessus ("scénario normal"), un deuxième scénario est considéré ("scénario extrême"), dans lequel tous les véhicules hautement automatisés activent chacun la CA sur RGD. Le modèle

national de trafic voyageurs (MNTP), les données de la Confédération sur l'élimination des goulots d'étranglement sur le réseau des routes nationales, les données sur les embouteillages de l'OFROU ainsi que les données météorologiques de MétéoSuisse sont utilisées comme base de données. Les passages sont décrits à la fois dans l'espace et dans le temps. En résumé, le résultat de l'estimation du nombre de passages en Suisse est présenté dans la figure 1. Toutes les valeurs sont des valeurs moyennes. Pour les types de transition 1 à 4, la dispersion est plus faible que pour le type de transition 5, pour lequel la valeur moyenne représente également des jours sans intempéries.

		Somme des transitions par jour			
		Scénario 1: Taux de pénétration de 30%		Scénario 2: Taux de pénétration de 60%	
		Scénario normal	Scénario extrême: 100% d'activation sur la RGD	Scénario normal	Scénario extrême: 100% d'activation sur la RGD
1.	Entrer dans la RGD	335'000	1'120'000	670'000	2'233'000
2.	Quitter la RGD	450'000	1'125'000	900'000	2'250'000
3.	Activation du contrôle des voies de circulation	195'000	0	390'000	0
4.	Changement de l'état de la circulation	18'500	0	36'900	0
5.	Changement des conditions météorologiques en «mauvais»	105	210	210	420

Fig. 1 2 Aperçu de la fréquence des transitions

## Exigences relatives aux transitions

Les exigences posées au système de transport ne peuvent pas être déduites uniquement sur le plan technique. De nombreux aspects, voire la plupart d'entre eux, découlent de valeurs et de normes qui, en fin de compte, doivent être définies par la société et la politique. Les documents stratégiques des départements et des offices fédéraux compétents constituent un fil conducteur. Ces documents ont été évalués.

Il ressort de ces bases de multiples exigences pour le système de transport, dont certaines sont indépendantes de la conduite automatisée. La conduite automatisée en Suisse doit couvrir le mieux possible ces exigences de la Confédération. Il s'agit de :

1. Sécurité routière objective : le nombre actuel d'accidents diminue.  
*Ordre de grandeur jusqu'en 2030 : diminution d'environ 50% (morts sur la route) et d'environ 40% (blessés graves).*
2. La sécurité routière subjective est adéquate.
3. Fluidité du trafic : les embouteillages diminuent par rapport à aujourd'hui.  
*Ordre de grandeur jusqu'en 2030 : diminution d'environ 25%.*
4. Les véhicules automatisés sont utilisés de manière à augmenter les capacités des infrastructures.
5. L'échange de données et la mise en réseau sont augmentés par rapport à aujourd'hui.
6. L'équipement des lignes est minimisé en termes de coût total.
7. Les infrastructures de transport sont réalisées en économisant l'espace.

Une pondération ou une hiérarchisation des exigences mentionnées ne peut pas être déduite des bases existantes. En conséquence, toutes les exigences doivent être couvertes le mieux possible.

## Observation de sections d'exemple

L'observation de tronçons exemplaires a permis d'analyser et de décrire la situation de départ actuelle en matière de flux de trafic et de sécurité routière pour les cinq types de passages à niveau. Partant de la situation actuelle, des concepts ont été développés pour les types de passages à niveau considérés, sur la manière dont ceux-ci peuvent être

aménagés (infrastructure, équipement) et exploités (commande, également par le biais d'une mise en réseau). Les concepts développés ont été évalués quant à leur impact sur la sécurité routière objective et subjective et sur la fluidité du trafic.

### **Transition 1 : Entrer dans la RGD**

Le tronçon exemple pour l'entrée à la jonction avec la N1 à Dietikon présente aujourd'hui une charge de trafic élevée, des pointes de trafic marquées et des états instables (dans 4,5% des créneaux horaires considérés). Les intervalles de temps consécutifs minimaux requis pour des raisons de sécurité ne sont souvent pas respectés, la vitesse autorisée sur le tronçon principal est souvent dépassée. L'entrée dans la RGD ne constitue pas un point fort des accidents enregistrés. Les fréquentes collisions par l'arrière sur les voies de dépassement dominant l'accidentologie sur le tronçon considéré.

Dans le concept élaboré, le conducteur est informé avant l'entrée dans la RGD que la commande peut être transférée au véhicule. Dès que les conditions relatives à la distance nécessaire par rapport au véhicule précédent et au respect de la limitation de vitesse sont remplies, la commande est transmise en quelques fractions de seconde. Pendant ce processus, les capteurs surveillent en permanence l'environnement. Après la prise de contrôle, le véhicule accélère pour atteindre la même vitesse que sur le trajet principal. Si le Ramp Metering (dosage de la rampe d'accès) est actif, le véhicule adapte sa vitesse de manière optimale en conséquence. Parallèlement, le véhicule coopère avec d'autres véhicules automatisés.

### **Transition 2 : Quitter la RGD**

Le tronçon exemple vers la sortie à la jonction avec la N1 à Dietikon présente - comme le tronçon exemple vers l'entrée dans la RGD - des états instables (dans 4,5% des créneaux horaires considérés) et des pointes de trafic marquées. Les intervalles de temps consécutifs minimaux requis pour des raisons de sécurité ne sont souvent pas respectés de manière significative, la vitesse autorisée sur le tronçon principal est souvent dépassée. Les accidents sur la sortie sont pour la plupart des auto-accidents ou des dérapages et sont notamment causés par des vitesses inadaptées en cas de pluie.

Dans le concept élaboré, le conducteur est invité à prendre le contrôle au plus tard 40 secondes avant d'atteindre la rampe de sortie. À ce moment-là, le véhicule doit déjà s'être engagé sur la voie de droite et se trouver à une distance suffisante du véhicule qui le précède pour que le conducteur puisse prendre le contrôle sans trop de difficultés. Lorsque le conducteur est invité à prendre le contrôle, les activités secondaires possibles sont limitées, par exemple en redressant le dossier du siège. En outre, la vitesse est légèrement réduite (de 120 à 100 km/h). La prise en charge par le conducteur/la conductrice doit avoir lieu avant d'atteindre la rampe de sortie. Pour éviter les manœuvres frénétiques, la fonction de prise en charge pourrait être bloquée à la hauteur de la sortie (au niveau de la ligne continue). Si le conducteur ne réagit pas, le véhicule ne passe pas sur la rampe de sortie, mais dépasse l'échangeur et attend à nouveau une prise en charge. Si l'absence de réaction du conducteur persiste, on considère qu'il s'agit d'une urgence médicale. Dans ce cas, le véhicule se dirige vers la bande d'arrêt d'urgence, où il active le niveau de repli.

### **Transition 3 : Activation de la commande de la voie de circulation**

Le tronçon exemple "Melide/Bissone - Mendrisio" sur la N2 présente en direction du nord quelques états de trafic instables (3,3% des créneaux horaires considérés) et des pics de charge marqués le week-end. Alors que les intervalles de temps consécutifs minimaux requis pour des raisons de sécurité ne sont souvent pas respectés, la vitesse autorisée n'est guère dépassée. L'analyse des accidents montre que sur ce tronçon, outre les dérapages, les pertes de maîtrise et les collisions par l'arrière, des accidents de dépassement et des accidents liés au changement de voie sont relativement souvent enregistrés par la police. Le manque d'égards lors du changement de voie et les dépassements trop rapprochés, causes fréquentes d'accidents, montrent le défi à relever sur ce tronçon.

Dans le concept élaboré, dans le cas 1 d'une forte interconnexion de données, l'infrastructure partage des informations sur l'exploitation spéciale de la voie de circulation. Sur la base de l'itinéraire prévu et de la distance qui en résulte par rapport à la sortie pertinente de la RGD, le véhicule émet une recommandation sur l'opportunité d'utiliser la bande de circulation supplémentaire. Dans le cas 2, l'utilisation de la bande de circulation est indiquée par des signaux, des marquages, des affichages DEL au sol ou en hauteur et est reconnue par le véhicule. Dans les deux cas, le véhicule indique au conducteur la possibilité d'un transfert de contrôle pour l'utilisation de la voie supplémentaire. Dès que les conditions relatives à la distance nécessaire par rapport au véhicule précédent et au respect de la limitation de vitesse sont remplies, le transfert de contrôle s'effectue en une fraction de seconde. Pendant ce processus, les capteurs surveillent en permanence l'environnement. Après la prise de contrôle, le véhicule passe dès que possible sur la voie de circulation supplémentaire. Une signalisation de la voie de circulation est nécessaire pour indiquer clairement que la voie de circulation ne doit pas être utilisée par des véhicules non automatisés. Malgré la restriction d'utilisation sur la voie supplémentaire, les véhicules non automatisés circulant sur la voie voisine doivent être observés et leur comportement doit être prévu afin de garantir la sécurité. En cas de panne sur la voie de circulation spéciale, la voie de circulation est fermée à tous les véhicules.

#### **Transition 4 : Changement d'état de la circulation**

Le tronçon exemple "Buchrain - Rotsee" sur la N14 présente une part particulièrement élevée d'états de trafic instables (10,4% dans le sens de circulation Rotsee) et des pics de charge marqués le matin et le soir. Alors que les intervalles de temps consécutifs minimaux requis pour des raisons de sécurité ne sont souvent pas respectés, la vitesse autorisée n'est pratiquement pas dépassée. L'analyse des accidents montre en particulier le grand potentiel de la conduite automatisée pour la sécurité en cas de forte affluence et de trafic ralenti. La technique permet d'éviter les collisions par l'arrière dues à des véhicules qui se rapprochent trop.

Le concept élaboré se base sur ces connaissances de la situation actuelle. Le passage du trafic mixte à la conduite automatisée est prévisible, mais temporaire. Le conducteur cède le contrôle et reçoit en contrepartie des incitations, par exemple sous forme de points de bonus directs auprès du service d'immatriculation des véhicules ou d'avantages lors de l'achat d'un véhicule par lequel on donne son accord obligatoire pour céder le contrôle dans les zones critiques. La remise de la commande peut se faire en une fraction de seconde, pour autant que les conditions marginales telles que la vitesse ou les écarts de temps de suivi soient respectées. Une condition essentielle à l'application est l'existence de données à haute résolution sur les zones présentant un état de circulation critique, comme l'atteinte d'une valeur limite de vitesse définie. Environ 10 secondes avant l'entrée dans la zone critique, une recommandation est faite au conducteur de passer le relais. Les véhicules non automatisés doivent être observés pendant le transfert et leur comportement doit être prédit.

#### **Transition 5 : Changement des conditions météorologiques en "mauvais"**

Le tronçon exemple "Sion-Est - Sierre-Ouest" sur la N9 se situe dans l'espace alpin. Sur ce tronçon, les intervalles de temps consécutifs minimaux requis pour des raisons de sécurité ne sont souvent pas respectés, de plus, la vitesse autorisée est particulièrement souvent dépassée. Les conditions de circulation instables sont pratiquement inexistantes, même en cas de fortes précipitations, l'état de la circulation reste stable. En revanche, les vitesses pratiquées sont nettement réduites lors de ces événements. L'analyse des accidents enregistrés confirme qu'en cas d'intempéries, il y a une grande proportion de dérapages et d'auto-accidents.

Cette transition est nécessaire, car elle pourrait entraîner une suppression (partielle) des capteurs. Dans le concept élaboré, la demande de prise en charge est adressée au conducteur environ 40 secondes avant d'atteindre la zone critique. Les activités secondaires possibles sont limitées (arrêt de la lecture d'un film, redressement de la position assise, etc.) Avant d'entrer dans la zone d'intempéries, la vitesse du véhicule est fortement réduite (par exemple à 40 km/h). En l'absence de réaction du conducteur, un avertissement est émis 20 secondes avant d'atteindre la zone critique et il est indiqué que

le véhicule sera immobilisé en cas de non-prise en charge. Sur la base de l'occupation de la bande d'arrêt d'urgence, qui est transmise au véhicule sous forme d'information, un changement de voie peut ainsi être initié et la vitesse réduite jusqu'à ce que la position de stationnement (par exemple la bande d'arrêt d'urgence) soit atteinte (niveau de repli).

## Conclusions

Les conséquences des concepts sur la sécurité routière objective et subjective et sur la fluidité du trafic (capacité du trafic, fiabilité) ont été évaluées qualitativement par l'équipe de projet. Les résultats montrent que pour les passages considérés, il devrait y avoir la plupart du temps une amélioration, mais jamais une détérioration par rapport à la situation actuelle. Tant la sécurité routière que la fluidité du trafic profitent en général des concepts élaborés.

Les conséquences des concepts diffèrent selon le modèle de transmission des données. Un réseau de données (public) fort permet souvent d'obtenir de meilleurs effets en termes de sécurité routière et de fluidité du trafic. Les raisons en sont une meilleure disponibilité ou un regroupement des informations ainsi qu'une meilleure prise en compte du point de vue systémique du gestionnaire d'infrastructure. Si l'échange de données est organisé au niveau des véhicules/constructeurs, il devrait y avoir peu d'intérêt à optimiser l'exploitation des routes.

Les concepts élaborés ont plusieurs aspects en commun. Tous les concepts trouvés présentent des points de changement de mode. Ceux-ci sont nécessaires pour informer le véhicule ou le système qu'il faut soit passer du fonctionnement automatisé à la commande humaine du véhicule (en tenant compte de la période de transition), soit que la commande peut être transférée de l'homme au système. Les points de changement de mode sont définis localement, mais la durée diffère selon le type de transition (temporaire ou fixe).

Pour les transitions du trafic mixte au trafic conventionnel, tous les concepts comprennent une bande d'arrêt d'urgence, nécessaire pour atteindre l'état de risque minimal. Il n'est pas possible d'y renoncer si l'on mise sur les concepts élaborés. En outre, il faut un niveau de repli (au sens d'un appel d'urgence) qui garantisse la sécurité des personnes dans les véhicules automatisés qui atteignent l'état de risque minimal.

Lors des transitions entre le trafic mixte et le trafic conventionnel, tous les concepts incluent une réduction de la vitesse pour les véhicules automatisés. Celle-ci doit d'une part servir à augmenter l'incitation à la prise en charge pour les conducteurs humains. D'autre part, elle doit permettre de réduire les conflits sur les tronçons routiers. L'ampleur de la réduction de la vitesse diffère toutefois selon les cas. De même, tous les concepts prévoient, lors des transitions entre le trafic mixte et le trafic conventionnel, un changement de la position assise dans le véhicule (surtout l'inclinaison du dossier du siège), ce qui limite les activités annexes dans le véhicule. Cette mesure semble importante pour augmenter la probabilité d'une prise en charge par l'homme et réduire la nécessité d'engager une manœuvre de minimisation des risques, qui peut malgré tout conduire à des conflits potentiels.

## Conséquences pour la réglementation

Le besoin de réglementation se base sur l'entrée en vigueur de la présente révision partielle de la loi fédérale sur la circulation routière (LCR) et sur le projet de consultation de l'ordonnance sur la conduite automatisée (OCA). La mémoire du mode de conduite qui y est contenue est définie en premier lieu de manière à documenter, en cas d'accident, si c'est le conducteur ou le système d'automatisation qui conduisait le véhicule au moment de l'accident. Il n'y a pas de stockage continu de données ni de dispositions relatives à la mise en réseau ou à l'échange de données en temps réel ou pendant la conduite.

Dans le cas d'une forte interconnexion de données (publiques), l'échange de données nécessaire doit donc être réglementé. Il convient de déterminer quelles données doivent être mises à disposition par le véhicule et dans quelle résolution, et quelles données doivent être reçues et traitées. D'autre part, il convient de déterminer si les informations issues de l'échange de données doivent être stockées dans le véhicule et, si oui, avec

quels standards. L'échange de données va bien au-delà des exigences posées jusqu'ici par l'OCA en matière de mémoire du mode de conduite, par exemple en ce qui concerne la réception et l'envoi continu de données ou la saisie et le traitement de données environnementales (météorologie, intensité lumineuse, marquage, etc.). Dans le cadre du présent projet de recherche, les données nécessaires aux concepts ont été décrites et classées en fonction du mode de communication (réception et envoi de données) et de la résolution temporelle.

Le "niveau de repli" contenu dans les concepts de transition doit également être défini juridiquement. Le niveau de repli devient actif après que le véhicule a atteint l'état de risque minimal (et s'est par exemple immobilisé sur une bande d'arrêt d'urgence). On peut imaginer que dans ce cas, la centrale de gestion du trafic doit être informée afin qu'elle puisse prendre d'éventuelles mesures (par exemple la fermeture de la bande d'arrêt d'urgence ou réduction de la vitesse maximale sur le tronçon de route nationale). En outre, le service d'urgence des autorités de police compétentes pourrait être activé si la personne dans le véhicule n'a pas répondu à la demande de prise en charge. Lors de la réglementation, il faut définir le cadre de la manière dont cette communication s'effectue techniquement et qui est responsable du traitement des messages correspondants.

Dans le cas d'une solution de données au niveau des véhicules/constructeurs, de nouveaux signaux doivent être créés pour les points de changement de mode pour le transfert des commandes au système ou au conducteur. Ces signaux indiquent où commence le passage de la conduite automatisée à la conduite conventionnelle ainsi que où peut avoir lieu une remise au système d'automatisation. Ces signaux doivent être inscrits dans l'ordonnance sur la signalisation routière (OSR). De plus, en cas de réalisation du concept de transition considéré pour "l'activation de la commande des voies de circulation", une nouvelle signalisation est nécessaire pour les voies de circulation qui ne peuvent être empruntées que par des véhicules automatisés.



## Summary

### Initial situation and objectives

Automated driving, as part of the digitization of mobility and traffic, will become a reality sooner or later. Under this premise, many players are preparing for its implementation and are trying to shape it in line with their goals. The permanent or temporary transfer of vehicle control from humans to a system offers various exploitation opportunities. From the point of view of the public sector in Switzerland, these especially include efficiency gains, increased road safety, new traffic control schemes, and a more flexible combination of public and private transport. However, there are also risks, such as a temporary loss of safety, increased traffic demand, or a sharp increase in the need for road traffic management.

Due to the lower complexity of the driving task, it can be assumed that highly or fully automated driving will first be allowed on Swiss freeways (Hochleistungsstrassen; HLS). Therefore, this research project focuses on transitions on HLS. Transitions are understood as changes between conventional traffic and mixed traffic, as well as between mixed traffic and exclusively automated traffic. These transitions still need to be specified for Switzerland - in terms of infrastructure design (including all structural elements) and operations (control, steering, handling, including the necessary equipment).

This research project addresses various questions:

- Which relevant criteria define the transitions between conventional and mixed traffic and between mixed and exclusively automated traffic (keyword operational design domain, ODD)?
- Where, when, and with what frequency do these transitions occur in Switzerland - considering the future scenarios for automated driving for passenger and freight traffic on the road? What challenges exist in these transitions today? What concepts for design and operation are conceivable for the transitions?
- What consequences do these concepts have for traffic flow (capacity) and road safety? Which ideas should be rejected in view of the Swiss conditions (high connection density, limited space, weather)?
- What principles can be derived for design and operation? What need for supplementation and adaptation arises in regulation?

### Definitions and scope of the study

The research project considers the period up to 2050 and focuses on highly automated driving (level 4) in mixed traffic. It is also conceivable that individual lanes on selected routes allow highly automated driving only. The definition of highly automated driving implies that the vehicle can initially only drive automatically on certain types of roads. Accordingly, it will be necessary to hand over the driving task. According to the FEDRO 2018/005 research project [16], it is assumed that between 30% (trend scenario) and 60% (defined extreme scenario) of the total fleet will be level 4 automated vehicles in passenger transport by 2050. In freight transport, the proportions are slightly higher.

To demonstrate the uncertainties and the range of potential future developments in vehicle connectivity, two different cases were considered:

1. A strong (public) data network: this involves state-organized and regulated data exchange of vehicles with the infrastructure, which primarily reflects public interests and the perspective of owners and operators. The aim is to achieve a comprehensive integration of vehicle-to-infrastructure (V2I) communication.
2. A solution at vehicle or manufacturer level: The data exchange is organized by the vehicle manufacturers or operators. There is no comprehensive communication with the infrastructure (V2I).

## Classification of transition areas

An accumulation of transitions is expected where the technical limits for many automation functions are reached or where the permitted or regulated operating range begins or ends. The operating conditions of the so-called Operational Design Domain (ODD) to be recognized by the automated vehicle include precipitation (rain, snow), time of day, light intensity, fog, road and lane markings, road categories, and geographical area. The main characteristics of the transitions can be divided into the aspects "infrastructure," "control," and "dynamic aspects" and can further be differentiated.

Based on the literature review, some factors considered less relevant for the ODD (e.g., the presence of bridges), factors that rarely occur in Switzerland (e.g., poor road markings), and unrealistic combinations were excluded. After careful consideration of the expected criticality and frequency of the various transition areas, the following five transitions were selected for detailed consideration:

1. entering the HLS, as a high frequency is expected
2. leaving the HLS, as a high frequency is expected, and particularly critical situations arise
3. activation of a lane-based control, as associated questions about restricted lane usage are of particular interest
4. changes in traffic conditions, as the associated questions regarding the possible obligation to hand over the vehicle control are of particular interest
5. weather changes to "bad," as there exist significant risks

## Analysis of the spatial and temporal frequency of transitions

The number of transitions per day or year was determined for the context of Switzerland. The temporal distribution over the day and the year and the spatial distribution of these transitions were examined. The following simplifying assumptions were made to estimate the frequency:

- Immediately after entering the freeway, 30% of the highly automated vehicles activate the automated driving functions (AD)
- If the lane-based control is active, an additional 30% activate the AD.
- In very heavy traffic (close to the capacity limit, e.g., in traffic jams), an additional 40% activate AD.
- If the weather changes to "bad" (sensors may no longer be able to control the vehicle on their own), 50% of the highly automated vehicles are driving automatically and need to hand back the control to the driver.
- Immediately before leaving the freeway, 40% drive automatically and then switch to manual control.

Due to the uncertainties, a sensitivity analysis is carried out in which two different penetration levels of automated vehicles (scenario 1 with 30% and scenario 2 with 60%) are analyzed. In addition to the activation behavior described above ("normal scenario"), a second scenario is considered ("extreme scenario") in which all highly automated vehicles activate the AD on the HLS. The National Passenger Transport Model (Nationales Personenverkehrsmodell; NPVM), federal data on the elimination of bottlenecks on the national road network, congestion data from FEDRO, and weather data from Meteo-Switzerland are used as the database. The transitions are described both spatially and temporally. In summary, the result of the estimated number of transitions in Switzerland can be seen in Fig. 1. All values are mean values. For transition types 1-4, the dispersion is smaller than for transition type 5, where the mean value also includes days without bad weather events.

		Sum of transitions per day			
		Scenario 1: Penetration rate of 30%		Scenario 2: Penetration rate of 60%	
		Normal scenario	Extreme scenario: 100% activation on the HLS	Normal scenario	Extreme scenario: 100% activation on the HLS
1.	Entering the HLS 	335'000	1'120'000	670'000	2'233'000
2.	Leaving the HLS 	450'000	1'125'000	900'000	2'250'000
3.	Activation of lane-based control 	195'000	0	390'000	0
4.	Change of traffic state to capacity limit / congestion 	18'500	0	36'900	0
5.	Change of weather conditions to «schlecht» 	105	210	210	420

**Fig. 1:** Overview of the frequency of transitions

## Requirements for transitions

Requirements for the transportation system cannot only be derived from technical aspects. Many or most aspects are based on values and norms that are ultimately determined by society and politics. Strategy documents by the responsible federal departments and offices provide guidelines. These were evaluated.

The basic principles provide a wide range of requirements for the transportation system, some of which are independent of automated driving. Automated driving in Switzerland must meet the following federal requirements as accurately as possible:

1. Objective road safety: today's accident figures fall *Order of magnitude by 2030: decrease of approx. 50% (road fatalities) and approx. 40% (serious injuries)*
2. The subjective road safety is adequate.
3. Traffic flow: congestion levels decrease compared to today. *Order of magnitude by 2030: decrease of approx. 25%*
4. Automated vehicles are used in such a way that the capacity of the infrastructure is increased
5. Data exchange and vehicle connectivity increase compared to today.
6. Road equipment is minimized in terms of overall costs.
7. The transport infrastructure is implemented in a space-saving manner.

A weighting or prioritization of the listed requirements cannot be derived from the existing principles. Accordingly, all requirements should be covered as much as possible.

## Consideration of sample sections

By looking at sample freeway sections, an analysis and description of the current situation regarding traffic flow and road safety was carried out for the five transition types. Based on the current situation, concepts were developed for the transition types under consideration as to how they can be designed (infrastructure, equipment) and operated (control, also via V2I communication). The developed concepts were assessed in terms of their impact on objective and subjective road safety and on traffic flow.

### Transition Type 1: Entering the HLS

The example section for entering the HLS at the junction with the N1 in Dietikon today has a high traffic load, pronounced traffic peaks, and unstable traffic conditions (in 4.5% of the considered time windows). The minimum following time gaps required for safety reasons are often undercut and the permitted speed on the freeway mainstream is often exceeded.

Entering the HLS is not a focus of the recorded accidents. The frequent rear-end collisions in the overtaking lanes dominate the accident situation in the considered road section.

In the developed concept, the driver is informed before entering the HLS that control can be transferred to the vehicle. As soon as the requirements regarding the necessary distance to the vehicle in front and compliance with the speed limit are met, the control is transferred within fractions of a second. The sensor system continuously monitors the surroundings during this process. After taking over control, the vehicle accelerates to reach the same speed as on the main route. If ramp metering is active, the vehicle adjusts its speed accordingly. At the same time, the vehicle cooperates with other automated vehicles.

### **Transition 2: Exiting the HLS**

The example section for exiting the HLS at the junction with the N1 in Dietikon - like the example section for entering the HLS - exhibits unstable conditions (in 4.5% of the considered time windows) and pronounced traffic peaks. The minimum following time gaps required for safety reasons are often significantly undercut, and the permitted speed on the freeway mainstream is often exceeded. Most accidents on the exit ramp are self-inflicted or skidding accidents and are particularly caused by inappropriate speeds in the rain.

In the developed concept, the driver is requested to take over at the latest 40 seconds before reaching the exit ramp. At this point, the vehicle must have switched to the rightmost lane and maintained a sufficient distance to the vehicle in front so that the driver can take control without any major challenges. In connection with the request to take over control, possible secondary activities for the driver are restricted, e.g., via moving the seatback in an upright position. In addition, the speed is reduced slightly (from 120 to 100 km/h). The driver must take over before reaching the exit ramp. To avoid hectic driving maneuvers, the takeover function could be blocked at the level of the exit (at the solid line). If the driver does not react, the vehicle will not change to the exit ramp but will drive beyond the junction and wait again for a takeover. If the driver still fails to respond, a medical emergency will be assumed. In this case, the vehicle steers onto the emergency lane, where it activates the fallback level.

### **Transition 3: Activation of the lane-based control**

The example section "Melide/Bissone - Mendrisio" on the N2 shows some unstable traffic conditions in the northbound direction (3.3% of the considered time windows) and pronounced traffic peaks on weekends. While the minimum following time gaps required for safety reasons are often undercut, the permitted speed is hardly ever exceeded. The accident analysis shows that, in addition to skidding and self-inflicted accidents as well as rear-end collisions, overtaking accidents and accidents when changing lanes are recorded relatively frequently by the police on this section. A lack of consideration when changing lanes and tailgating as frequent causes of accidents show the challenge on this section.

In the developed concept, in case 1 of a strong data network, the infrastructure shares information about the special operation of the lane. Based on the planned route and the resulting distance to the relevant exit from the HLS, the vehicle recommends whether it makes sense to use the additional lane. In case 2, the operation of the lane is indicated by signals, markings, and LED displays on the ground or overhead and recognized by the vehicle. In both cases, the vehicle informs the driver of the possibility of transferring control to use the additional lane. As soon as the requirements regarding the necessary distance to the vehicle in front and compliance with the speed limit are met, the transfer of control takes place within fractions of a second. The sensor system continuously monitors the surroundings during this process. After taking over control, the vehicle switches to the additional lane as soon as possible. Signalization of the lane is necessary to indicate that the lane may not be used by non-automated vehicles. Despite restrictions on the additional lane, non-automated vehicles in the adjacent lane must be monitored, and their behavior must be predicted to ensure safety. In the event of a breakdown in the special lane, the lane is closed to all vehicles.

#### **Transition 4: Change of traffic state**

The example section "Buchrain - Rotsee" on the N14 has a particularly high proportion of unstable traffic conditions (10.4% in the direction of Rotsee) and pronounced peaks in the morning and evening. While the minimum following time gaps required for safety reasons are often undercut, the permitted speed is hardly ever exceeded. The analysis of the accidents particularly shows the great potential for an increased safety that automated driving has in heavy traffic volumes and stop-and-go traffic. Thanks to technology, rear-end collisions due to tailgating can be prevented.

The developed concept builds on these findings about the current situation. The transition from mixed traffic to automated control is expected but it is temporary. The driver hands over the control and receives incentives for doing so, for example, through direct bonus points at the vehicle registration office or benefits when purchasing a vehicle, with which one bindingly agrees to relinquish control in critical areas. Control can be handed over within a fraction of a second, provided boundary conditions such as speed or following time gaps are met. An essential prerequisite for the application is high-resolution data on zones with critical traffic conditions, such as when a defined speed limit is reached. Approximately 10 seconds before entering the critical zone, a recommendation to hand over the control is made to the driver. Surrounding non-automated vehicles must be observed during the handover, and their behavior must be predicted.

#### **Transition 5: Weather change to "bad"**

The example section "Sion-Est - Sierre-Ouest" on the N9 is located in the Alpine region. On this section, the minimum following time gaps required for safety reasons are often undercut, and the permitted speed is also exceeded particularly frequently. Unstable traffic conditions are practically non-existent; traffic conditions remain stable even when there is heavy precipitation. However, the speeds driven are significantly reduced during these events. The analysis of the recorded accidents confirms that there is a high proportion of skidding and self-inflicted accidents in bad weather.

The transition is necessary because the sensors could be (partially) omitted. In the developed concept, the driver is prompted to take over about 40 seconds before reaching the critical zone. Possible secondary activities are restricted (stopping movie reproductions, raising the seat position, etc.). Before entering the bad weather zone, the speed of the vehicle is greatly reduced (e.g., to 40 km/h). If the driver does not react, a warning is issued 20 seconds before the critical zone is reached and the driver is informed that the vehicle will be stopped if the takeover request is not accepted. Based on the emergency lane occupancy, which is transmitted to the vehicle as information, a lane change can be initiated, and the speed can be reduced to such an extent that the stop position (e.g. emergency lane) is reached (fallback level).

### **Findings**

The project team qualitatively assessed the consequences of the concepts on objective and subjective road safety and traffic flow (traffic capacity, reliability). The results show that the considered transitions are likely to improve, but never worsen, the current situation. Both traffic safety and traffic flow generally benefit from the developed concepts.

The consequences of the concepts differ depending on the data transmission model. A strong (public) data network often achieves better road safety and traffic flow effects. The reasons for this are the better availability or bundling of information and the greater consideration of the systemic infrastructure operator perspective. If data exchange is organized at the vehicle/manufacturer level, there will likely be little interest in optimizing road operations.

The developed concepts have various aspects in common. All the identified concepts have operating change points. These are necessary to give the vehicle or system the information that the operation must be switched from automated to human control (considering the transition time), or that control can be transferred from the human to the system. The locations of the operating change points are defined, but the activation period differs depending on the type of transition (temporary or permanent).

In the transition from mixed traffic to conventional traffic, all concepts include an emergency lane, which is necessary to reach the minimum risk state. This cannot be dispensed with if one relies on the concepts developed. In addition, a fallback level (in the sense of an emergency call) is needed to ensure the safety of people in automated vehicles that reach the minimum risk state.

In the transition from mixed traffic to conventional traffic, all concepts include reducing the speed of automated vehicles. On the one hand, this is intended to increase the incentive for human drivers to take over. On the other hand, conflicts on the road sections should be reduced. However, the extent of the speed reduction differs from case to case. All concepts also include a change of seating position in the vehicle at the transition from mixed traffic to conventional traffic (in particular, moving the seat back into an upright position), which restricts secondary activities in the vehicle. This measure seems important to increase the probability of human takeover and reduce the need to initiate a risk-minimizing maneuver, which can still lead to potential conflicts.

### **Implications for regulation**

The need for regulation is based on the present partial revision of the Road Traffic Act (Strassenverkehrsgesetz; SVG) and the consultation draft of the Ordinance on Automated Driving (Verordnung zur Automatisierten Fahren; AFV). The driving mode memory contained therein is primarily defined in such a way that, in the event of an accident, it documents whether the driver or the automation system was in control of the vehicle at the time of the accident. There is no continuous data storage and no provision for data exchange in real time or while driving.

In the case of a strong (public) data network, the necessary data exchange must therefore be regulated. It must be determined what data must be provided by the vehicle in what resolution and what data must be received and processed. On the other hand, it must be regulated whether information from the data exchange must be stored in the vehicle and, if so, what standards need to be followed. The data exchange goes far beyond the requirements for the driving mode memory previously listed in the AFV, e.g., regarding the continuous reception and transmission of data or the recording and processing of environmental data (meteorology, light intensity, markings, etc.). In this research project, the necessary data for the concepts were described and categorized according to communication channel (data reception, data transmission) and temporal resolution.

The "fallback level" contained in the transition concepts must also be legally defined. The fallback level is activated after the vehicle has reached the minimum risk level (and has come to a standstill on a hard shoulder, for example). In this case, it is conceivable that the traffic management center must be notified to initiate any necessary measures (e.g., closure of the hard shoulder or reduction of the speed limit on the

# 1 Ausgangslage und Zielsetzung

## 1.1 Problembeschreibung

Das automatisierte Fahren als Teil der Digitalisierung in Mobilität und Verkehr wird früher oder später kommen. Unter dieser Prämisse bereiten sich viele Akteure auf das automatisierte Fahren vor und versuchen, dieses möglichst im Sinne ihrer Ziele zu gestalten. Denn durch die permanente oder temporäre Übergabe der Fahrzeuglenkung vom Menschen an ein System bestehen verschiedene Chancen, die es zu nutzen gilt. Aus Sicht der öffentlichen Hand in der Schweiz sind dies insbesondere der Effizienzgewinn, die erhöhte Verkehrssicherheit, neue Möglichkeiten zur Vernetzung sowie Verkehrssteuerung oder die flexiblere Kombination von öffentlichen und privaten Transportleistungen. Doch es bestehen auch Risiken wie zwischenzeitliche Sicherheitsverluste, die erhöhte Verkehrsnachfrage oder eine starke Zunahme des Organisationsbedarfs im Strassenraum.

Die anfänglich grosse Euphorie mit grossen Versprechungen seitens Fahrzeughersteller bzgl. kurzfristiger Marktreife ist mittlerweile einer rationaleren (und realistischeren) Sicht gewichen. Trotzdem zeichnet sich ab, dass das automatisierte Fahren die Mobilität grundlegend verändern wird. Dies bekräftigen zahlreiche Forschungsprojekte und Studien (vgl. Kapitel 1.2). Gemäss ASTRA-Zielbild 2050 [13] soll auf nationaler Ebene das automatisierte Fahren ermöglicht werden. Die automatisierten Fahrzeuge sollen jedoch zunehmend kollektiv genutzt werden und auch der ÖV soll gestärkt aus der Transformation hervorgehen. Die gravierendsten Engpässe auf dem Nationalstrassennetz sollen beseitigt werden und mit einem vorausschauenden Verkehrsmanagement sollen die vorhandenen Kapazitäten besser genutzt werden. Auf den Strassen ist das Nebeneinander der Verkehrsmittel zu gewährleisten.

Insbesondere der letzte Punkt dieses Zielbildes ist hinsichtlich der Gestaltung und des Betriebs der Strasseninfrastruktur von grosser Bedeutung. Es muss davon ausgegangen werden, dass auch in 30 Jahren ein Teil der Fahrzeuge vom Menschen gelenkt werden und somit auch konventionelle Fahrzeuge auf den Strasseninfrastrukturen verkehren können müssen. Dabei wird es zu Mischverkehr kommen, der Herausforderungen in zwei verschiedenen Dimensionen aufweist: Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Automatisierungsstufen (intramodal) und Interaktionen zwischen automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsmitteln (intermodal).

Hochleistungsstrassen (HLS) und Hauptverkehrsstrassen (HVS) ausserorts sind – aufgrund der damit verbundenen Bedeutung der Verkehrsmittel – vor allem in der ersten Dimension (intramodal, unterschiedliche Automatisierungsstufen) von der Automatisierung betroffen. Mischverkehr – beispielsweise mit dem Fuss- und Veloverkehr – ist vor allem ein innerörtliches bzw. städtisches Phänomen und betrifft die HLS und HVS ausserorts nicht oder nur untergeordnet. Aus Sicht Fahrzeug und Infrastruktur ist vor allem der Unterschied von teilautomatisierten zu hoch- bzw. vollautomatisierten Systemen relevant, weil kein Fahrer bzw. keine Fahrerin mehr die Fahraufgabe übernehmen muss. Daraus entstehen veränderte Ansprüche an die Infrastruktur.

Unter der Annahme, dass aufgrund der geringeren Betriebskomplexität zuerst die HLS für hoch- bzw. vollautomatisierte Fahrzeuge nutzbar gemacht werden und die HVS ausserorts erst später freigegeben werden, rücken die Übergänge der Netzhierarchie (bspw. HLS-Anschlüsse) in den Fokus. In den Transformationsphasen des automatisierten Fahrens findet insbesondere hier der Übergang zwischen konventionellem Verkehr und Mischverkehr statt. Daneben sind aber auch Übergänge innerhalb eines Strassentyps vorstellbar, insbesondere wenn es um den Übergang zwischen Mischverkehr und vollautomatisiertem Verkehr geht. Beispielsweise ist denkbar, im Rahmen von Engpassbeseitigungen zusätzlich geschaffene Fahrstreifen auf HLS von Beginn an oder bei ausreichender Flottendurchdringung nur automatisierten Fahrzeugen mit hohem Besetzungsgrad zugänglich zu machen, um die Effizienz (in Bezug auf Fahrzeugbelegung und Strassenkapazitäten) zu steigern.

Die Übergänge zwischen konventionellem Verkehr und Mischverkehr sowie zwischen Mischverkehr und ausschliesslich automatisiertem Verkehr sind bisher für die Schweiz nicht konkretisiert – sowohl in Bezug auf die Gestaltung (Infrastruktur mit allen baulichen Elementen) als auch auf den Betrieb (Steuerung, Lenkung, Abwicklung inkl. dafür benötigte Ausstattung). Es gilt dabei insbesondere das Zusammenspiel mit der Verkehrssicherheit (objektiv und subjektiv) und dem Verkehrsfluss bzw. der Kapazität zu berücksichtigen. Beispielsweise besteht das Risiko einer erhöhten Unfallzahl sowie reduzierten Kapazitäten, wenn sich automatisierte Fahrzeuge in diesen Bereichen nicht sinnvoll in die Verkehrsabwicklung einfügen. Da diese Übergangsbereiche in der Strassenhierarchie bereits heute für auftretende Verkehrszustände massgebend sein können, wären die Folgen für das Strassennetz entsprechend gross.

Erkenntnisse aus internationalen Forschungen können oft nicht für die Schweiz übernommen werden, da besondere Eigenschaften des Nationalstrassennetz (bspw. hohe Anschlussdichte, teilweise hoher Anteil an Tunnelabschnitten, Platzkonkurrenz) oder des Klimas (bspw. Temperaturspektrum, Niederschläge, Nebelaufkommen) zu berücksichtigen sind. Die wesentlichen Prinzipien für die Gestaltung und den Betrieb der Übergangsbereiche, die für eine vorausschauende Planung des Schweizer Nationalstrassennetzes eingesetzt werden können, sind derzeit offen. Der Erforschung der Übergangsbereiche für die Schweiz kommt also eine wichtige Funktion zu bei der Einführung des automatisierten Fahrens.

Der Bundesrat hat im Zusammenhang mit dem automatisierten Fahren die Teilrevision des Strassenverkehrsgesetzes (SVG) sowie die Neuerarbeitung der Verordnung über das automatisierte Fahren (AFV) aufgelegt. Damit soll das automatisierte Fahren bis Anfang der 2030er-Jahre abgedeckt werden. Zur Teilrevision des SVG hat vom 12. August 2020 bis 12. Dezember 2020 die Vernehmlassung stattgefunden. In der Frühjahrssession 2023 hat das Parlament die Anpassungen am SVG beschlossen, welche nun gestaffelt in Kraft treten. Die Vernehmlassung zur AFV wurde am 18. Oktober 2023 eröffnet und läuft bis zum Februar 2024. Es noch derzeit noch nicht klar, wie die regulatorischen Instrumente in Bezug zu den Übergängen in einer nächsten Revision, die das automatisierte Fahren für den Horizont nach den 2030er-Jahre abdeckt, anzupassen sind.

## 1.2 Stand der Forschung

Das ASTRA hat mit einem eigenen Forschungspaket mit dem Titel "Auswirkungen des automatisierten Fahrens" [13] auf die technologische Entwicklung reagiert. Dieses zeigt mögliche Szenarien und deren Folgen für den Personen- und Güterverkehr in der Schweiz auf und gibt Handlungsempfehlungen ab. Dabei wurden sieben verschiedene Teilprojekte erarbeitet (siehe unten). Aber auch in der Studie "Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag", die vom Schweizerischen Städteverband mit verschiedenen anderen Akteuren erarbeitet wurde, wird ein Entwicklungspfad für die Schweiz mit einer Abfolge bzgl. Freigabe von Strassen für das automatisierte Fahren skizziert, die den Inhalten des ASTRA-Forschungspakets ähnlich ist [24]. Dabei wird darauf hingewiesen, dass in den Übergangszuständen mit einer zunehmenden Anzahl an Konflikten zwischen hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen zu rechnen ist. Diese Konflikte könnten zu Unfällen führen und auch weitere, heute kaum beobachtete Unfallursachen, -hergänge und -muster, deren Ursache mit dem automatisierten Fahren zusammenhängt, könnten neu die Sicherheit im Strassenverkehr negativ beeinflussen. Die Gewährleistung der Sicherheit ist daher eine zentrale Herausforderung der Automatisierung. In der TA-Swiss-Studie "Automatisiertes Fahren in der Schweiz: Das Steuer aus der Hand geben?" [25] werden die Folgen des automatisierten Fahrens in drei verschiedenen Szenarien für die Schweiz abgeschätzt. Dabei wird abgeleitet, dass insbesondere der möglicherweise über Generationen andauernde Zustand mit "level-gemischten" Fahrzeugen bedacht werden muss. Die Automatisierung soll genutzt werden, um positive Lösungsbeiträge für verschiedene Probleme beim Klima, dem Energie- und Ressourcenverbrauch und der Überlastung der Verkehrssysteme zu erreichen. Zudem wird aus einer ethischen Perspektive hergeleitet, dass ein automatisiertes Fahrzeug dann sicher genug ist, wenn es sicherer ist als ein Fahrzeug, das von einem Menschen gesteuert

wird. Der Grund dafür liegt darin, dass einem technischen System weniger Fehler verziehen werden.

Viele internationale Studien beschäftigen sich mit der Fragestellung, welche Auswirkungen die neuen Systeme auf den Strassenverkehr der Zukunft haben werden. Durch das veränderte Fahrverhalten der automatisierten Fahrzeuge im Vergleich zu menschlichen Fahrern wird erwartet, dass sich der Verkehrsfluss auf den Strassen verändert [26, 27]. Sofern auch geringere Fahrzeugfolgeabstände gestattet wären als aktuell beim konventionellen Fahren empfohlen, könnten Kapazitätssteigerungen von etwa 30% im Fernstrassennetz erreicht werden [28]. Insbesondere die Stabilität des Verkehrsflusses verbessert sich durch die automatisierten Fahrzeuge mit der Fähigkeit zur Kommunikation [29]. Zusätzlich zu den verringerten Zeitlücken führt auch die erhöhte Geschwindigkeit bei konstanter Dichte (Fahrzeugpuls) zu signifikanten Kapazitätssteigerungen, dies hat Friedrich 2015 aufgezeigt [30]. Auch im städtischen Verkehr können durch das automatisierte Fahren abgestimmtes Verkehrsmanagement Steigerungen der Kapazität beispielsweise an Lichtsignalanlagen erwartet werden [31].

Das automatisierte Fahren verspricht ausserdem gemäss Harper et al. [32] eine Steigerung des Fahrkomforts und der Mobilität von Personen, denen bisher keine Pkw zur Verfügung standen. Dies kann zu induziertem Verkehr, also zusätzlichen Fahrten mit dem MIV, und damit zu mehr Verkehr auf den Strassen führen, was Axhausen et al. und Hörl et al. aufgezeigt haben [14, 15]. Auch die Sicherheit spielt bei der Einführung automatisierter Fahrzeuge eine bedeutende Rolle. Während viele Forschungsarbeiten davon ausgehen, dass sich die Anzahl der Verkehrsunfälle durch die Einführung des automatisierten Fahrens substantiell reduzieren wird [33], gibt es noch grossen Forschungsbedarf im Hinblick auf neuartige Unfälle, die aus der veränderten Verkehrszusammensetzung heraus erst entstehen könnten [34].

Insbesondere in Hinblick auf die Wirkungen der Systeme, ist zunächst zu unterscheiden, welcher Grad der Automatisierung betrachtet wird. Während Fahrerassistenzsysteme bereits eine Stufe des automatisierten Fahrens darstellen, gibt es hier noch eine/n Fahrer/in, der oder die das System stets überwachen müssen und damit in der Verantwortung sind. Abb. 3 gibt einen Überblick über die verwendeten Nomenklaturen verschiedener Institutionen (SAE, BAST, NHTSA) und deren Bedeutung im Hinblick auf die Kontrolle des Fahrzeugs.

Level	Name	Narrative Definition	DDT <sup>(1)</sup>		DDT Fallback	ODD
			Sustained Lateral and Longitudinal Vehicle Motion Control	OEDR		
<b>Driver Performs Part or All of the DDT</b>						
0	No Driving Automation	The performance by the <i>driver</i> of the entire DDT, even when enhanced by active safety systems.	Driver	Driver	Driver	n/a
1	Driver Assistance	The <i>sustained</i> and ODD-specific execution by a <i>driving automation system</i> of either the lateral or the longitudinal <i>vehicle motion control</i> subtask of the DDT (but not both simultaneously) with the expectation that the <i>driver</i> performs the remainder of the DDT.	Driver and System	Driver	Driver	Limited
2	Partial Driving Automation	The <i>sustained</i> and ODD-specific execution by a <i>driving automation system</i> of both the lateral and longitudinal <i>vehicle motion control</i> subtasks of the DDT with the expectation that the driver completes the OEDR subtask and supervises the <i>driving automation system</i> .	System	Driver	Driver	Limited
<b>ADS ("System") Performs the Entire DDT (While Engaged)</b>						
3	Conditional Driving Automation	The <i>sustained</i> and ODD-specific performance by an ADS of the entire DDT with the expectation that the DDT <i>fallback-ready user</i> is receptive to ADS-issued requests to intervene, as well as to DDT performance-relevant <i>system failures</i> in other <i>vehicle</i> systems, and will respond appropriately.	System	System	Fallback-ready user (becomes the driver during fallback)	Limited
4	High Driving Automation	The <i>sustained</i> and ODD-specific performance by an ADS of the entire DDT and DDT <i>fallback</i> without any expectation that a user will need to intervene.	System	System	System	Limited
5	Full Driving Automation	The <i>sustained</i> and unconditional (i.e., not ODD-specific) performance by an ADS of the entire DDT and DDT <i>fallback</i> without any expectation that a user will need to intervene.	System	System	System	Unlimited

Abb. 3 Automatisierungsstufen (Basis: SAE, 2021 [35])

In den durch die SAE definierten Level 3 und höher übernimmt das System die Überwachung des Verkehrsumfeldes. Das System muss dann alle Situationen, für die es definiert wurde, eigenständig bewältigen können. In den Levels 4 und 5 sogar in dem Fall, dass eine Übernahmeaufforderung missachtet wird. Bei Level-5-Fahrzeugen sind dies alle

Fahrsituationen, laut einiger Forscher/innen (bspw. Shladover [36]) ist es aber fraglich, ob dies in den nächsten Jahrzehnten möglich sein wird. Für die Zulassung solcher Systeme mit eingeschränktem Anwendungsbereich für den öffentlichen Strassenverkehr müssen die Anwendungsfälle genau spezifiziert werden. In der sog. Operational Design Domain (ODD) werden Faktoren spezifiziert, die festlegen in welchen Umgebungen die Fahrzeuge eigenständig fahren können und wo die Grenzen liegen. Diese beinhalten unter anderem Tageszeiten, Wetterbedingungen oder Eigenschaften der Strasseninfrastruktur. Befindet sich ein Fahrzeug ausserhalb dieser ODD, muss die Kontrolle an den Fahrer übergeben werden, vgl. [35]. Allerdings gibt es bisher keine detaillierten Spezifikationen, wie die ODD beschrieben sein soll. Einige Forschungsarbeiten liefern hierfür Vorschläge, bspw. [37, 38].

Aus dem Forschungsprojekt ASTRA 2018/005 [16] geht hervor, dass es noch eine lange Zeit dauern wird, bis ein signifikanter Teil der Schweizer Fahrzeugflotte automatisiert sein wird. Im Jahr 2050 werden je nach Szenario noch 40 bis 70 Prozent der Fahrzeuge vom Menschen gelenkt werden. Der Mischverkehr aus Fahrzeugen verschiedener Automatisierungsgrade wird in den nächsten Jahrzehnten auf den Schweizer Strassen vorherrschen. Ausserdem wurden in dem Projekt Einführungsszenarien skizziert, die auch den Aspekt beinhalten, dass automatisierte Fahrzeuge zunächst nicht alle Typen von Infrastruktur nutzen können, sondern diese nach und nach freigegeben werden (vgl. Abb. 4).

Strasstyp	Jahr	2020	2030	2040	2050
HLS (Autobahn)		✗	✓	✓	✓
HVS ausserorts (Landstrasse)		✗	✗	✓*	✓
ES/SS und HVS innerorts (Stadtstrassen)		✗	✓*	✓	✓

- ✓ vollumfängliche Nutzbarkeit AF-Level 4 in allen Räumen
- ✓\* räumlich eingeschränkte Nutzbarkeit AF-Level 4 auf ausgewählten Relationen oder Gebieten (z.B. Stadt Zürich für automatisierte Taxiflotten als Erstanwender 2030 oder z.B. Verbindungsstrecken zwischen HLS-Anschlüssen und bereits für AF nutzbaren Stadtstrassen 2040)
- ✗ Strasstyp ist für AF-Level 4 noch nicht nutzbar (Ausnahmen bilden Pilotstrecken)

**Abb. 4** Übersicht prognostizierte Nutzbarkeit durch automatisierte Fahrzeuge des Levels 4 je Strasstyp; HLS: Hochleistungsstrassen, HVS: Hauptverkehrsstrassen, ES: Erschliessungsstrassen, SS: Sammelstrassen; gemäss Busch et al., 2020 [16]

Es ist also vorhersehbar, dass an vielen Stellen Übergaben zwischen dem automatisierten System und dem menschlichen Fahrer erforderlich sein werden. Eine sichere Übergabe der Fahraufgabe von der Maschine auf den Menschen und vice versa ist dort zu gewährleisten. Es dürfen keine gefährlichen Situationen entstehen. Nach einem sog. Take Over Request (TOR) muss eine gewisse Zeit zur Verfügung stehen, in der ein Fahrer, insbesondere wenn dieser sich zuvor vom Geschehen abwenden durfte, die Situation wieder vollständig verstehen und darauf reagieren kann, siehe [39]. Dies muss im Ablauf der Übergabe berücksichtigt werden. Sowohl bei der Übergabe an das System als auch zurück an den Fahrer muss die Dauer und der Ablauf präzise definiert und spezifiziert werden, wie Wintersberger et al. [40] aufzeigen. Je nach Nebentätigkeit, die die Personen während der automatisierten Fahrt durchführen, bedarf es laut einer Studie des GDV [41] bis zu 15 Sekunden, bis Fahrer/innen eine angemessene Reaktion zeigen und das Geschehen wieder kontrollieren können. Weiterhin bleibt fraglich, wie gut Menschen überhaupt die Rolle der Überwachung wahrnehmen können (siehe [42]) und in der Lage sind, die Kontrolle über ein System in komplexen Situationen zu übernehmen, wenn durch die zunehmende Automatisierung Fähigkeiten und Situationsbewusstsein verloren gehen, vgl. [43].

Für die Übergabe bedarf es einer adäquaten Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Menschen und der Maschine, siehe [44]. Zusätzlich ist es denkbar, dass auch eine Kommunikation von der Infrastruktur zum Fahrzeug an gewissen Stellen erforderlich wird,

wie Voege und Zhivov [45] beschreiben. Neben der technischen Sicht aus dem Fahrzeug und der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist es auch von Interesse, zu untersuchen, ob infrastrukturelle Anpassungen erforderlich werden, um die Übergabe zu erleichtern oder im Falle einer Missachtung der Übergabeaufforderung angemessen reagieren zu können. Damit verbunden stellen sich auch zahlreiche Datenfragen, insbesondere da die Vernetzung als Voraussetzung für das automatisierte Fahren betrachtet wird. Für die Übergangsbereiche sind die Verfügbarkeit, die Nutzung und der Austausch von verkehrlichen Daten zu beachten. Der Bund sieht dabei einen vielversprechenden Ansatz in einem Datenverbund, siehe [46].

Des Weiteren ist zu erwähnen, dass in jüngster Vergangenheit und aktuell international viele Projekte zu verwandten Themenbereichen gefördert wurden und werden. So beschäftigen sich etliche Projekte mit den Wirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die verkehrstechnischen Kapazitäten bzw. die Effizienz (z.B. CoExist, Socrates 2.0) und auf die Sicherheit des Verkehrsablaufs (z.B. SAFE-UP, SVA, StreetWise+, SLAIN). Darunter sind einige Studien, die Fahrzeuge verschiedener Automatisierungsstufen und im Mischverkehr untersuchen und dabei auch Übergänge verschiedener Bereiche der Infrastruktur oder an nationalen Grenzen betrachten (z.B. CoExist, I-AT, TransAID). Eines der Ziele in den Forschungsprojekten ist es, die Infrastruktur vorzubereiten, sodass die Übergangsphase mit zunehmend automatisierten Fahrzeugen bestmöglich unterstützt und die Potenziale genutzt werden können (z.B. INFRAMIX, InDiD, MANTRA), wobei auch der Einbezug der automatisierten Fahrzeuge in die Verkehrssteuerung eine Rolle spielt (z.B. FRONTIER, Socrates 2.0). Darüber hinaus bestehen weiterhin Fragestellungen bzgl. der Zulassung, des Testens und der Absicherung von automatisierten Fahrzeugen, wofür derzeit Prozesse und Methoden entwickelt werden (z.B. Pegasus, ENABLE-S3, Streetwise, VV Methods). Im August 2023 haben die kalifornischen Behörden den Unternehmen Waymo und Cruise die Genehmigung erteilt, im Stadtgebiet von San Francisco uneingeschränkt automatisierte Taxifahrten auf SAE-Level 4 ohne begleitenden Fahrer anzubieten. Weitere Städte bzw. Einsatzgebiete sollen folgen.

## 1.3 Forschungsvorhaben

### Zielsetzung

Anknüpfend an den dargelegten Forschungsstand sind die wesentlichen Forschungsfragen für diese Arbeit:

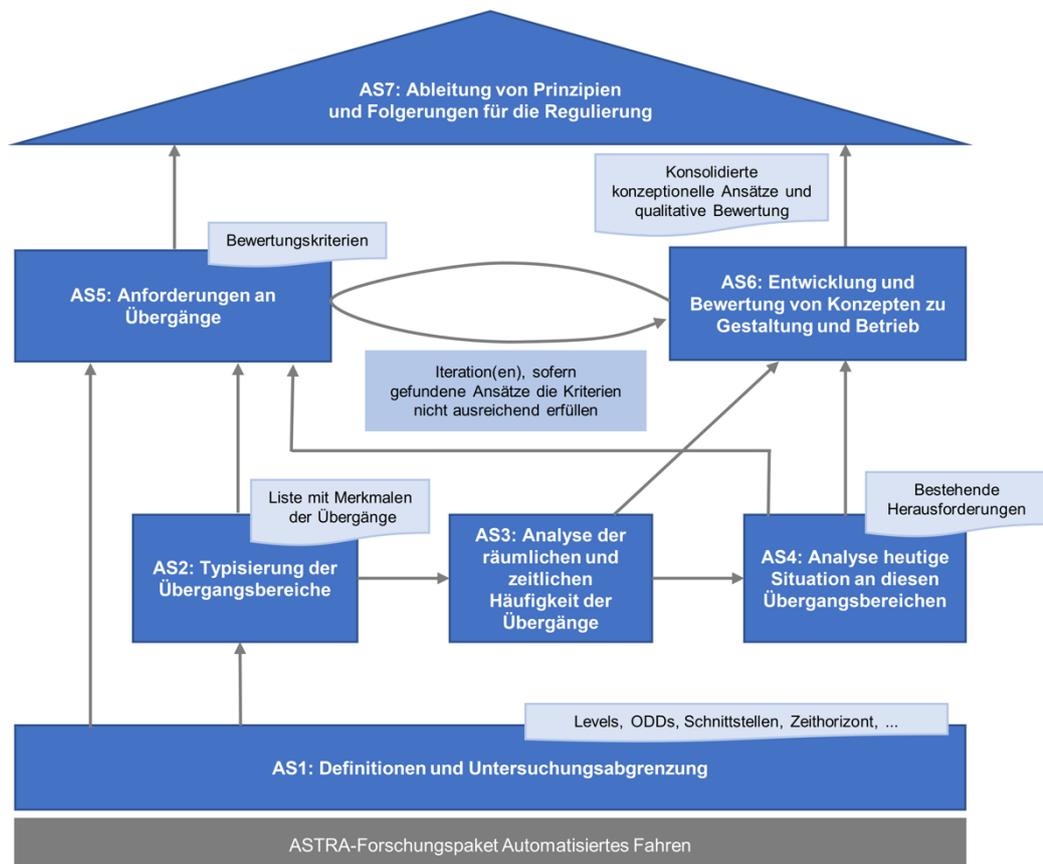
- Welche massgeblichen Kriterien definieren die Übergänge zwischen dem konventionellen Verkehr und Mischverkehr sowie zwischen Mischverkehr und ausschliesslich automatisiertem Verkehr (Stichwort ODD)?
- Wo, wann und in welcher Häufigkeit treten diese Übergänge – unter Berücksichtigung der Zukunftsszenarien zum automatisierten Fahren für den Personen- und Güterverkehr auf der Strasse – in der Schweiz auf? Welche Herausforderungen bestehen dazu in diesen Übergängen heute?
- Welche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb sind für die Übergänge hinsichtlich Einführung des automatisierten Fahrens denkbar?
- Welche Folgen haben diese Konzepte auf Verkehrsfluss (Kapazität) und Verkehrssicherheit? Welche Konzepte sind unter Berücksichtigung der Schweizer Gegebenheiten (hohe Anschlussdichte, beengte Platzverhältnisse, Wetter) zu verwerfen?
- Welche Prinzipien können für die Gestaltung und den Betrieb abgeleitet werden? Welcher Ergänzungs- und Anpassungsbedarf entsteht in der Regulierung?

### Vorgehen und Methodik

Das vorliegende Forschungsvorhaben baut auf den Erkenntnissen des ASTRA-Forschungspakets zum automatisierten Fahren auf. Zur Bearbeitung der Forschungsfragen werden verschiedene Arbeitsschritte (AS) ausgeführt (vgl. Abb. 5):

- AS1: Definitionen und Untersuchungsabgrenzung (vgl. Kapitel 2)
- AS2: Typisierung der Übergangsbereiche (vgl. Kapitel 3)

- AS3: Analyse der räumlichen und zeitlichen Häufigkeit der Übergänge (vgl. Kapitel 4)
- AS4: Analyse der heutigen Situation an diesen Übergangsbereichen (vgl. entsprechende Unterkapitel nach Beispielabschnitten in Kapitel 6)
- AS5: Anforderungen an Übergänge (vgl. Kapitel 5)
- AS6: Entwicklung Bewertung von Konzepten zu Gestaltung und Betrieb (vgl. entsprechende Unterkapitel nach Beispielabschnitten in Kapitel 6)
- AS7: Ableitung von Prinzipien und Folgerungen für die Regulierung (vgl. Kapitel 7)



**Abb. 5** Übersicht Vorgehen

## 2 Abgrenzung, Definitionen und Annahmen

Im Fokus dieses Kapitels stehen die diesem Projekt zugrunde liegenden Annahmen. Insbesondere werden Aspekte wie der Betrachtungshorizont, die verschiedenen Automatisierungsstufen, die Durchdringung der Flotte mit automatisierten Fahrzeugen, das erwartete Fahrverhalten, die eingesetzte Sensortechnologie, die Aktivierung der automatisierten Fahrfunktionen, die erwarteten Kontrollübergaben zwischen Fahrer oder Fahrerin und Fahrzeug sowie die Berücksichtigung des Strassenverkehrsgesetzes beschrieben. Diese Elemente bilden das Fundament für die weitere Analyse im Rahmen dieses Projekts.

### 2.1 Betrachtungshorizont

Im Projekt wird der Zeitraum bis 2050 betrachtet. Gemäss ASTRA-Zielbild 2050 [13] soll auf nationaler Ebene das automatisierte Fahren ermöglicht werden. Zudem sollen die gravierendsten Engpässe auf dem Nationalstrassennetz beseitigt und mit einem vorausschauenden Verkehrsmanagement die vorhandenen Kapazitäten besser genutzt werden. Wie in den folgenden Abschnitten dargelegt, kann bis dahin nicht von einer vollständigen Durchdringung durch automatisierte Fahrzeuge ausgegangen werden. Auf den Strassen ist das Nebeneinander der Verkehrsmittel zu gewährleisten.

### 2.2 Automatisierung

Das automatisierte Fahren umfasst verschiedene Stufen, die die Ausprägung des Automatisierungsgrades beschreiben. Diese reichen im Allgemeinen von Stufe 0 bis Stufe 5, wie zum Beispiel vom ASTRA [19] beschrieben.

**Stufe 0: Nicht automatisiert** - Das Fahrzeug wird vollständig manuell gesteuert, ohne jegliche automatisierte Assistenzsysteme.

**Stufe 1: Assistent** - Das Fahrzeug kann temporär entweder die Längs- oder Querführung übernehmen, aber der Fahrer oder die Fahrerin hat weiterhin die Hauptverantwortung und Kontrolle. So fällt unter Level 1 etwa ein Spurhalteassistent oder ein Abstandsregeltempomat (ACC), mit dem das Fahrzeug die eigene Geschwindigkeit und die Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug reguliert.

**Stufe 2: Teilautomatisiert** - Das Fahrzeug kann sowohl die Längs- als auch Querführung gleichzeitig steuern, also beispielsweise gleichzeitig Lenken und Beschleunigen. Jedoch muss der Fahrer weiterhin die Überwachung und Kontrolle über das Fahrzeug behalten.

**Stufe 3: Bedingt automatisiert** - Das Fahrzeug kann in bestimmten Situationen die Fahraufgaben übernehmen, ohne dass das System dauerhaft durch die Fahrerin oder den Fahrer überwacht werden muss. Dennoch muss die Fahrerin oder der Fahrer nach einer vorherigen Warnung in der Lage sein, wieder die Kontrolle des Fahrzeugs zu übernehmen.

**Stufe 4: Hochautomatisiert** - Das Fahrzeug kann in den meisten Situationen automatisiert fahren, ohne dass ein(e) menschliche(r) Fahrer(in) eingreifen muss. Es ist erforderlich, dass das Fahrzeug in der Lage ist, einen sicheren Zustand zu erreichen, ohne dass ein(e) menschliche(r) Fahrer(in) eingreifen muss. Das kann bedeuten, dass das Fahrzeug an den Strassenrand fährt oder auf einem Parkplatz zum Stillstand kommt. Dennoch ist die Automatisierung des Fahrzeugs auf Stufe 4 noch an bestimmte Bedingungen gebunden, wie beispielsweise eine definierte Strecke, das Fahren auf der Autobahn oder im Parkhaus.

**Stufe 5: Vollautomatisiert** - Das Fahrzeug übernimmt die Fahraufgabe vollumfänglich. Es kann in allen Situationen und Umgebungen ohne menschliches Eingreifen fahren.

Dieses Forschungsvorhaben konzentriert sich im Wesentlichen auf hochautomatisiertes Fahren (Stufe 4) im Mischverkehr. Auf einzelnen Fahrstreifen auf ausgewählten Strecken

ist auch vollständig hochautomatisiertes Fahren denkbar. Aus der Definition des hochautomatisierten Fahrens ergibt sich, dass das Fahrzeug zunächst nur auf bestimmten Strassentypen automatisiert fahren kann. Dementsprechend werden Übergaben der Fahraufgabe nötig, wie in Kapitel 3 genauer beschrieben wird.

## 2.3 Vernetzung

Die Vernetzung von Fahrzeugen und die damit verbundene Möglichkeit, drahtlos Informationen über Geschwindigkeit und Position umliegender Fahrzeuge auszutauschen, verspricht grosse Potentiale. Die grössten Vorteile ergeben sich, wenn alle Fahrzeuge untereinander kommunizieren können und zusätzlich von der Infrastruktur Informationen erhalten. Hinsichtlich des Umfangs und der Geschwindigkeit der Vernetzung zwischen Fahrzeugen (V2V) sowie der Verkehrsinfrastruktur (V2I) bestehen grosse Unsicherheiten, wie bspw. Agora Verkehrswende 2020 aufzeigt [47]. Moderne Fahrzeuge sind bereits heutzutage nicht isoliert; es wird aber erwartet, dass die Vernetzung in Zukunft deutlich umfassender sein wird. Einerseits gilt die Prämisse, dass zu jedem Zeitpunkt ein sicherer Fahrmodus gewährleistet sein muss und die Fahrfunktionen dementsprechend unabhängig von zusätzlichen Daten sein müssen, die dem Fahrzeug möglicherweise über eine Vernetzung bereitgestellt werden. Andererseits bietet die Kombination von Automatisierung und Vernetzung viele Vorteile. Der Austausch von Fahrzeugdaten bei besonderen Ereignissen wie Gefahrensituationen oder Unfällen kann die Gesamtsicherheit des Systems weiter erhöhen. Zudem ermöglicht die Vernetzung eine verbesserte Verkehrssteuerung und kooperatives Fahren. Um die Unsicherheiten und die Bandbreite potenzieller zukünftiger Entwicklungen aufzuzeigen und aufgrund der bisher fehlenden Entscheidung für die Schweiz wurden für die Wirkungsanalyse der Fahrzeugautomatisierung zwei Szenarien betrachtet:

1. Starker (öffentlicher) Datenverbund: Hierbei handelt es sich um eine staatlich organisierte und reglementierte Vernetzung der Fahrzeuge mit der Infrastruktur, die weitgehend die öffentlichen Interessen sowie die Perspektive der Eigentümer und Betreiber abbildet. Dabei wird eine umfassende Integration von Vehicle-to-Infrastructure (V2I) angestrebt.
2. Lösung auf Fahrzeug- oder Herstellerebene: Diese Vernetzung wird von den Fahrzeugherstellern oder -betreibern organisiert. Es erfolgt keine umfassende Vernetzung mit der Infrastruktur (V2I).

## 2.4 Flottendurchdringung

Aus dem Forschungsprojekt ASTRA 2018/005 (Teilprojekt 5) [16] geht hervor, dass es noch eine lange Zeit dauern wird, bis ein signifikanter Teil der Schweizer Fahrzeugflotte automatisiert sein wird. Im Projekt wurde die Flottendurchdringung unter anderem basierend auf Annahmen zur Entwicklung des Fahrzeugbestands, der Alterung der Fahrzeuge und der Einführung der Automatisierung in Serienfahrzeugen berechnet. Um die Sensitivität der Parameter auf den gesamten Bestand der automatisierten Fahrzeuge in der zukünftigen Schweizer Fahrzeugflotte zu testen, wurden vier verschiedene Szenarien für den Personenverkehr und zwei Szenarien für den Güterverkehr definiert und analysiert. Im Trendszenario wird für das Jahr 2050 im Personenverkehr ein Anteil von 30% bis 35% automatisierte Fahrzeuge an der Gesamtflotte prognostiziert. In einem festgelegten Extremszenario beträgt der Anteil im Personenverkehr zwischen 60% und 65%. Beim Güterverkehr wird im Trendszenario von rund 39% Anteil automatisierter Fahrzeuge an der Gesamtflotte ausgegangen, im Extremszenario von rund 67%. Aufgrund der kürzeren Lebensdauer und der höheren ökonomischen Anforderungen dürfte im Güterverkehr die Automatisierung schneller voranschreiten. Im Vergleich zu Prognosemodellen aus anderen Projekten befinden sich diese Ergebnisse im Mittelfeld, siehe [16].

## 2.5 Aktivierung des Systems

Im Schnitt sind die Menschen in der Schweiz gegenüber Fahrerassistenzsystemen positiv eingestellt, siehe Zimmermann & Deublein, 2024 [48]. Je nach System wird es von ca. 11% bis 60% der befragten Autofahrer/-innen genutzt. Insbesondere Tempomat, ACC, sowie Notbrems-, Spurhalte- und Spurwechselassistent sind den meisten Befragten bekannt und werden von mindestens 28% genutzt. Allerdings nutzen nicht alle Fahrzeugbesitzer/-innen die in ihrem Fahrzeug verfügbaren Fahrerassistenzsysteme. Beispielsweise nutzen nur 55% der Personen, die einen Einparkassistenten besitzen, diesen auch. Es kann also angenommen werden, dass nicht alle Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen auch wann immer möglich automatisiert fahren, sondern die Fahrer/-innen je nach persönlicher Einstellung und Situation entscheiden. Falls das automatisierte Fahren zunächst nur auf der HLS erlaubt ist, so ist zum Beispiel anzunehmen, dass bei sehr kurzen Fahrten von nur wenigen Kilometern die automatisierte Fahrfunktion seltener genutzt wird. Wie in Kapitel 4 näher erläutert, werden im Projekt verschiedene Szenarien hinsichtlich der Aktivierung der automatisierten Fahrfunktionen betrachtet.

## 2.6 Fahrverhalten

Das prognostizierte Fahrverhalten von automatisierten Fahrzeugen hängt von verschiedenen Einflussgrössen ab. Im Allgemeinen wird jedoch erwartet, dass sich das Fahrverhalten in Längs- und Querrichtung im Vergleich zu Fahrzeugen, die von Menschen gesteuert werden, verändert. Dies ist teilweise auf die präzisere Aktorik ohne stochastische Elemente sowie die auf Sensoren basierende Umgebungserfassung und -wahrnehmung zurückzuführen. Zudem spielen die Einhaltung der Verkehrsregeln sowie die Vernetzung und Kooperation eine entscheidende Rolle bei automatisierten Fahrzeugen, siehe [49].

Eine der Herausforderungen bei der Modellierung und Simulation von automatisierten Fahrzeugfunktionen besteht darin, dass bislang nur wenige experimentelle Feldversuche durchgeführt wurden, die als empirische Datenquelle dienen. Diese wurden bspw. in den Studien [50, 51, 52] genutzt, um die entsprechenden Modelle zu kalibrieren und zu validieren. Allerdings beschränkt sich die Gültigkeit der Kalibrierung auf die spezifischen Situationen, in denen die Daten erhoben wurden, und lässt sich nur schwer auf andere Situationen übertragen. In ihrer Studie zu den Wirkungen automatisierten und vernetzten Fahrens fasst Milakis [54] mögliche Auswirkungen zusammen. Es wird allgemein erwartet, dass die Kapazität mit zunehmendem Grad des automatisierten Fahrens steigt, allerdings gibt es auch widersprüchliche Ergebnisse. Diese Widersprüche entstehen teilweise aufgrund der Verwendung uneinheitlicher Terminologie, wodurch unterschiedliche Fahrerassistenzsysteme unter dem Begriff "automatisiertes Fahrzeug" subsumiert werden. Zudem basieren die Ergebnisse hauptsächlich auf Simulationsstudien, die wie oben beschrieben, stark von den getroffenen Annahmen abhängen, siehe [55].

Derzeit werden automatisierte Fahrfunktionen in abgesperrten Bereichen (z.B. MCube in München [56]) oder in Langsamfahrbereichen (z.B. in Bad Birnbach [57]) getestet. Einzelne Funktionen sind allerdings bereits weiter verbreitet (z.B. Level-3-Staupilot von Mercedes [58]). Mit der zunehmenden Verbreitung der Technologie und der Verfügbarkeit umfassenderer empirischer Daten könnten die bestehenden Unsicherheiten bei der Modellierung verringert werden. Die Vernetzung ermöglicht zusätzlich eine Kooperation zwischen den automatisierten Fahrzeugen und eine Verkürzung der Folgezeitlücke. Auf Basis vorliegender Verkehrssimulationen wird in dieser Studie eine reduzierte Zeitlücke (ca. 0.9s) zwischen automatisierten Fahrzeugen angenommen. Damit wird auf HLS bei vollständiger Durchdringung eine Kapazitätzunahme in der Grössenordnung von 20-30% erreicht, vgl. [28].

Zum Vergleich: In der UN-Richtlinie 157 [23] zum automatisierten Spurhalteassistenten ("automated lane keeping system", ALKS), also SAE-Level-3-Fahrzeugen, sind minimale zeitliche Abstände von 1.0s bis 1.6s vorgesehen, abhängig von den Geschwindigkeiten bis 60km/h. Beim Abstandsregeltempomat ("adaptive cruise control", ACC) wird die

Folgezeitlücke heute auf 1.3s bis 2.5s geschätzt. Brunner [53] zeigt auf, dass mit "cooperative adaptive cruise control" (CACC) der zweiten Generation unter Nutzung der Kommunikationsmöglichkeiten zwischen den Fahrzeugen ein zeitlicher Abstand von 0.9s mit geringerer Schwankung möglich ist. Dies stellt gegenüber menschlichen Fahrer/innen mit Folgezeitlücken zwischen 1.0s und 2.2s eine deutlich Verkürzung dar.

## 2.7 Sensortechnologie

Es gibt verschiedene Typen von Sensoren, die sich je nach ihrem technischen Funktionsprinzip und der angestrebten Wirkung unterscheiden lassen. Sensoren zur Erfassung der Fahrdynamik überwachen kontinuierlich die Bewegungen des Fahrzeugs in den drei Achsen (längs, quer und vertikal). Durch die Messung von Raddrehzahl und Lenkwinkel können sie beispielsweise gefährliche Situationen erkennen und präventiv eingreifen. Bekannte Beispiele hierfür sind Antiblockiersystem (ABS) und Adaptive Cruise Control (ACC).

Die sensorische Erfassung der Umgebung des Fahrzeugs konzentriert sich auf Aspekte wie Fahrbahnbegrenzungen, Fahrstreifen, Hinderniserkennung und die Erkennung anderer Fahrzeuge. Kameras, Radar, Ultraschall- sowie Laser- und Lidarsensoren haben sich als gängige Technologien etabliert und sind weit verbreitet. Experten erwarten, dass die Sensorausstattungen mittelfristig je nach Grad der Automatisierung und Fahrzeugklasse aus einer Kombination von Kamera, Radar und Lidar bestehen werden, siehe [59]. Die entsprechenden Spezifikationen bzw. Stärken und Schwächen sind in Abb. 6 dargestellt. Es wird sich zeigen, ob sich in den kommenden Jahrzehnten einer der drei Sensoren als dominanter Sensor etablieren wird oder ob weiterhin eine Kombination der Sensoren als Branchenstandard bestehen bleibt.

SPEZIFIKATIONEN		KAMERA	RADAR	LIDAR
ENTFERNUNG	REICHWEITE	●●	●●●	●●●
	AUFLÖSUNG	●●	●●●	●●
WINKEL	REICHWEITE	●●●	●●	●●●
	AUFLÖSUNG	●●●	●	●●
KLASSIFIZIERUNG	GESCHW.AUFLÖSUNG	●	●●●	●●
	OBJEKTKATEGORISIERUNG	●●●	●	●●
UMGEBUNG	NACHTS	●	●●●	●●●
	REGEN/BEWÖLKT	●	●●●	●●

GUT ● BESSER ●● OPTIMAL ●●●

Abb. 6 Sensoren und ihre jeweiligen Spezifikationen. Bildquelle: National Instruments [60].

Es ist davon auszugehen, dass die Sensorik unter gewissen Bedingungen nicht fehlerfrei arbeiten kann. Beispielsweise könnte Starkregen oder anderweitige erschwerte Witterung die Sensorik anfällig für Ausfälle machen. In Abschnitt 4.6 werden daher Grenzwerte beschrieben, bis zu denen die Sensorik wie geplant arbeiten soll und bei dessen Erreichen vermehrt Übergaben an die menschlichen Fahrer/-innen zu erwarten sind (siehe dazu auch die Literaturübersicht in [61, 62, 63, 64, 65, 66, 67]).

## 2.8 Kontrollübergabe

Wenn automatisierte Fahrzeuge in Zukunft zeitweise die Fahrzeugführung übernehmen, entsteht die Notwendigkeit, die Fahrzeugkontrolle zwischen Fahrer/-in und automatisiertem System zu übergeben. Dabei können neue Herausforderungen und Probleme entstehen, die es zu bewältigen gilt. Dazu gehören das Wohlbefinden der Insassen, der Abbau von Fahrfähigkeiten, mentale Über- oder Unterforderung und der Verlust des Situationsbewusstseins, vgl. [68]. Ein besonderes Augenmerk sollte auf die

Phase des "transition-of-control" (TOC) gelegt werden, in der die Verantwortung für das Fahrzeug zwischen Mensch und Maschine hin- und herwechselt. Ein Schlüsselaspekt bei der Bewältigung dieser Herausforderungen ist die Unterscheidung zwischen zufällig auftretenden und geplanten TOC-Anfragen. In einigen Fällen kann ein Übergang zur Handhabung des Fahrzeugs kurzfristig erforderlich sein, während in anderen Situationen der Übergang in Ruhe vorbereitet werden kann.

Die Zeitspannen, die benötigt werden, um die Steuerung zu übernehmen und sie zu stabilisieren, sind ebenfalls von entscheidender Bedeutung. In der Regel haben Fahrer/-innen etwa 1 bis 15 Sekunden Zeit, um die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen, aber es kann weitere 35 bis 40 Sekunden dauern, bis die Situation stabilisiert ist.

## 2.9 Rückfallebene

Falls der Fahrer/die Fahrerin nicht reagiert, wenn der Aufruf zur Übernahme von der automatisierten Steuerung zum manuellen Fahrbetrieb kommt, greift eine Rückfallebene. Dies beinhaltet, dass das Fahrzeug auf dem Pannestreifen abgestellt wird und damit zunächst in einen verkehrssicheren Zustand ausserhalb des fliessenden Verkehrs gebracht wird. Weil die Möglichkeit besteht, dass seitens des Fahrers/der Fahrerin nicht reagiert wurde, da ein medizinischer Notfall vorliegt, ist ein weiterer Bestandteil der Rückfallebene die automatische Benachrichtigung relevanter Dienstleistungen. Dazu zählen insbesondere die Information an die Rettungsdienste und den Notfalldienst der Polizei (Sicherung der Abstellfläche). Auch die Verkehrsmanagementzentrale benötigt den Standort des Fahrzeugs, um verkehrliche Massnahmen zu ergreifen wie bspw. die Sperrung des Pannestreifens.

In Abgrenzung zum e-Call, einer automatischen Verbindung zur Notrufnummer 112 bei einem schweren Unfall, bei dem auch der Airbag ausgelöst wird, wird bei der hier angesprochenen Rückfallebene nicht von einem Unfall mit Beteiligung anderer Fahrzeuge ausgegangen, da das automatisierte Fahrzeug zuvor mit aktivierten AF unterwegs war. Es ist jedoch ebenfalls möglich, dass eine Sprechverbindung zur Notrufnummer aufgebaut wird, so dass durch den Fahrer/die Fahrerin die Notsituation beschrieben werden kann.

### 3 Typisierung der Übergangsbereiche

#### 3.1 Merkmale der Übergänge

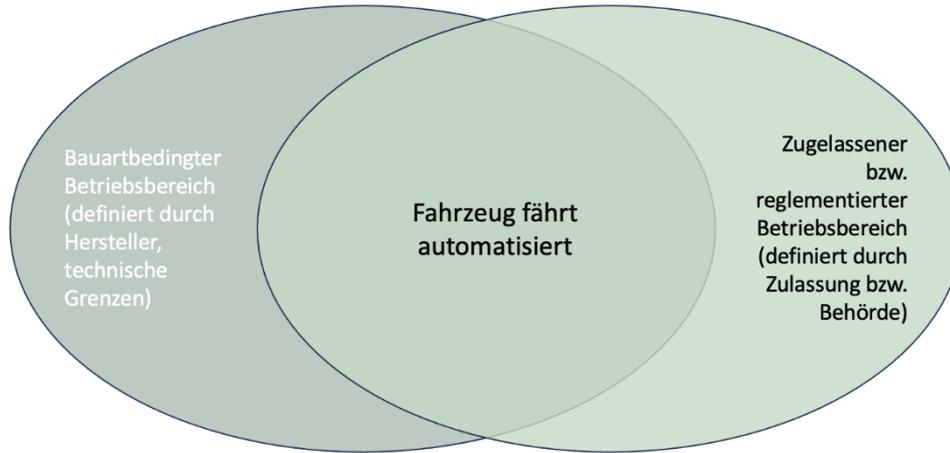


Abb. 7 Schematische Darstellung der Einschränkungen des automatisierten Betriebs

Eine Häufung von Übergängen wird dort erwartet, wo die technischen Grenzen für eine Vielzahl von Automatisierungsfunktionen erreicht sind oder der zugelassene bzw. reglementierte Betriebsbereich beginnt oder endet, zum Beispiel beim Verlassen der Autobahn. In diesen Bereichen ändert sich der Verkehr von Mischverkehr auf rein konventionellen Verkehr bzw. vollständig hochautomatisierten Verkehr oder umgekehrt. Die Einschränkungen des automatisierten Betriebs in Abb. 7 schematisch dargestellt.

Die vom automatisierten Fahrzeug zu erkennenden Bedingungen der Operational Design Domain (ODD) umfassen Niederschlag (Regen, Schnee), Tageszeit, Lichtintensität, Nebel, Strassen- und Fahrbahnmarkierungen, Strassenkategorien (z.B. Anzahl der Fahrstreifen, getrennte Fahrstreifen) und den geografischen Bereich, siehe Durchführungsverordnung der EU 2022/1426 [69]. Die wesentlichen Merkmale für die Übergänge werden im Folgenden in die Aspekte "Infrastruktur", "Steuerung" und "dynamische Aspekte" unterteilt.

#### Infrastruktur

Merkmal	Kategorisierung	Begründung	Expert*inneneinschätzung Relevanz
Anschlussstellen	Anschlussstypen	Automatisiertes Fahren zuerst auf HLS erlaubt → Übergabe der Fahraufgabe bei Auffahren/ Verlassen der HLS notwendig	<i>Relevant:</i> Hohe Anschlussdichte auf Schweizer Autobahnen, Begrenzung des zugelassenen Betriebsbereichs denkbar
Fahrstreifen Steigung/Neigung	Standard   Spezialfall Gering   Stark	Führen zu mehr Interaktionen durch Fahrstreifenwechselmanöver	<i>Ggf. relevant:</i> Anzahl Fahrstreifen bzw. Fahrstreifenbreite und Steigung/Neigung können das Fahrverhalten beeinflussen
Tunnel	Ja   Nein	Im Tunnel spezielle Anforderungen an die Sicherheit	<i>Ggf. relevant:</i> Mobile Daten/GPS in Tunneln eventuell eingeschränkt, gleichzeitig besserer Ausbaustandard.
Ausbaustandard (RSUs)	Gut   Schlecht	Unterstützt Vernetzung zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur	<i>Ggf. relevant:</i> Vernetzung ermöglicht vorausschauendes Fahrverhalten der automatisierten Fahrzeuge
Brücke	Hoch   Niedrig	Spezielle Anforderungen an die Sicherheit	<i>Nicht relevant:</i> Fahraufgabe wird nicht verändert
Strassenverhältnisse Markierungsqualität	Gut   Schlecht Gut   Schlecht	Kann Aktorik beeinflussen	<i>Nicht relevant:</i> Guter Zustand auf Schweizer Autobahnen

Abb. 8 Übergangsmerkmale aus dem Bereich "Infrastruktur"

Im Rahmen der Infrastruktur werden verschiedene Strassenkategorien, Qualitätszustände sowie Besonderheiten wie Steigungen, Tunnel und Brücken berücksichtigt. Zunächst ist eine Betriebsbegrenzung des automatisierten Fahrens auf Schweizer Autobahnen vorgesehen. Dies macht die Übergabe der Fahraufgabe bei Auffahren bzw. Verlassen der Autobahn notwendig. Dieser Punkt ist gerade im Schweizer Kontext relevant, da auf Schweizer Autobahnen eine hohe Anschlussdichte besteht. Zudem könnten Änderungen in der Fahrstreifenbreite und -anzahl sowie Steigung und Neigung das Fahrverhalten verändern. Im Tunnel werden spezielle Anforderungen an die Sicherheit gestellt, allerdings

ist hier gleichzeitig der Ausbaustandard besonders hoch. Während eine schlechte Qualität des Strassenbelags und der Markierungen die Aktorik beeinflussen könnte, werden diese Themen aufgrund des guten Standards auf Schweizer Autobahnen als weniger relevant angesehen.

### Steuerung

Merkmal	Kategorisierung	Begründung	Expert*inneneinschätzung Relevanz
Freigabe einzelner Fahrstreifen für AVs	Ja   Nein	Ggf. vermehrte Übergabe Fahrer an Fahrzeug, um zusätzlichen Fahrstreifen zu nutzen	<i>Relevant:</i> HLS-Abschnitte mit Aufweitungen von zwei auf drei Fahrstreifen, von denen einer ausschließlich für automatisierte Fahrzeuge freigegeben ist (bestehend und gemäß STEP-NS geplant)
Dynamische Pannestreifenfreigabe	Ja   Nein   nur für AVF	Dynamische Pannestreifenfreigabe für AVF könnte die Kapazität erhöhen	<i>Nicht relevant:</i> Pannestreifen werden aus Sicherheitsgründen für Pannefahrzeuge benötigt. Eine Freigabe für AVF ist nicht geplant.
Variable Speed Limits	Ja   Nein	Durch Vernetzung könnten die automatisierten Fahrzeuge zusätzliche Informationen erhalten.	<i>Nicht relevant:</i> Fahraufgabe wird nicht verändert
Stauwarnung	Ja   Nein		
Routing	Ja   Nein		

Abb. 9 Übergangsmerkmale aus dem Bereich "Steuerung"

Es ist denkbar, dass das deterministische Fahrverhalten und die geringeren Zeitlücken im Sinne der Steuerung für eine Steigerung der Kapazität genutzt werden könnten. Dazu gehören zum Beispiel die temporäre Pannestreifenfreigabe, angepasste variable Geschwindigkeitsbegrenzungen, neue Routingverfahren und die dynamische Freigabe einzelner Fahrstreifen exklusiv für automatisierte Fahrzeuge. Insbesondere die Freigabe von einzelnen Fahrstreifen für hochautomatisierte Fahrzeugsysteme ist auf Autobahnabschnitten mit drei Fahrstreifen (inklusive der Abschnitte, die gemäss STEP-NS von zwei auf drei Fahrstreifen erweitert werden) denkbar.

### Dynamische Aspekte

Merkmal	Kategorisierung	Begründung	Expert*inneneinschätzung Relevanz
Sichtverhältnisse	Gut   Schlecht	Kann Erkennung von Objekten durch Sensorik beeinflussen → Ggf. Einschränkung bauartbedingter Betriebsbereich	<i>Relevant:</i> Diese Faktoren werden explizit in der EU-Verordnung genannt und könnten technische Grenzen definieren
Niederschlag	Ja   Nein		
Lichtintensität	Hoch   Niedrig		
Verkehrszustand	Frei   Kapazität   Gestaut	Kann Komplexität der Steuerungsaufgabe beeinflussen.	<i>Relevant:</i> Diese Faktoren beeinflussen die notwendige Übergabezeit, einzelne Fahrfunktionen sind nur in bestimmten Situationen zugelassen (Bsp. Staupilot)
Schwerverkehrsanteil	Gut   Schlecht	Spezielle Anforderungen an die Sicherheit und Sensorik	<i>Nicht relevant:</i> Eher für das Gesamtszenario bzw. einen größeren Bereich zu betrachten. Wenn sich in einer konkreten Situation die (lokale) Durchdringungsrate ändert, sollte das keinen Einfluss haben.
Anteil an AVF	Hoch   Niedrig	Vernetzungspotentiale werden beeinflusst	

Abb. 10 Übergangsmerkmale aus dem Bereich "dynamische Aspekte"

Dynamische Aspekte beinhalten in erster Linie Witterungs- und Verkehrszustände. Beispielsweise können schlechte Sichtverhältnisse (durch Niederschlag, Nebel, Lichtintensität) die Erkennung von Objekten durch die Sensorik beeinflussen. Diese Faktoren können dementsprechend den Betriebsbereich technisch einschränken. Als solche werden sie explizit in der EU-Verordnung genannt. Zudem beeinflussen der Verkehrszustand sowie die Verteilung der Nachfrage und Geschwindigkeiten auf verschiedene Fahrstreifen die Komplexität der Fahraufgabe. Aktuell sind einzelne Fahrfunktionen auch nur in bestimmten Situationen zugelassen (Bsp. Staupilot).

## 3.2 Merkmalskombinationen

Die Berücksichtigung sämtlicher Faktor-Ausprägungen in verschiedenen Kombinationen führt zu mehr als 1.5 Millionen möglichen Ausprägungen von Übergangsbereichen. Auf Basis der Literaturrecherche wurden einige als für die ODD weniger relevant eingestufte Faktoren (z.B. das Vorhandensein von Brücken) sowie in der Schweiz sehr selten auftretende Faktoren (z.B. schlechte Strassenmarkierungen) und unrealistische Kombinationen ausgeschlossen. So konnte die Anzahl der Kombinationen auf ein

überschaubares Mass gekürzt (siehe Abb. 11) und mit den Experten und Expertinnen diskutiert werden.

Index	Übergangsart	Verkehrszustand	Witterungszustand	Fahrstreifenbasierte Steuerung	Anschlussstelle	Änderung
1	Mischverkehr -> Konventionell	Kapazitätsbereich/Stau/Freifluss	Gut	Inaktiv	Nicht vorhanden	Witterung auf Schlecht
2	Konventionell -> Mischverkehr	Kapazitätsbereich/Stau/Freifluss	Schlecht	Inaktiv	Nicht vorhanden	Witterung auf Gut
3	Mischverkehr -> Konventionell	Kapazitätsbereich/Stau/Freifluss	Gut	Inaktiv	vorhanden	Witterung auf Schlecht
4	Konventionell -> Mischverkehr	Kapazitätsbereich/Stau/Freifluss	Schlecht	Inaktiv	vorhanden	Witterung auf Gut
5	Mischverkehr -> Konventionell	Kapazitätsbereich/Stau/Freifluss	Gut	Inaktiv	vorhanden	Verlassen der HLS
6	Mischverkehr -> Vollautomatisiert	Stau	Gut	Inaktiv	Nicht vorhanden	Aktive FS-Steuerung
7	Mischverkehr -> Vollautomatisiert	Kapazitätsbereich	Gut	Inaktiv	Nicht vorhanden	Aktive FS-Steuerung
8	Mischverkehr -> Vollautomatisiert	Kapazitätsbereich/Stau/Freifluss	Gut	Inaktiv	Nicht vorhanden	In Anschlussbereich
9	Mischverkehr -> Vollautomatisiert	Kapazitätsbereich/Stau/Freifluss	Gut	Aktiv	Nicht vorhanden	In Anschlussbereich
10	Mischverkehr -> Vollautomatisiert	Freifluss	Gut	Inaktiv	Nicht vorhanden	Stau/Kapazität

Abb. 11 Zu erwartende kritische und häufig auftretende Merkmalskombinationen

### 3.3 Auswahl für die weitere Betrachtung

Nach sorgfältiger Berücksichtigung der voraussichtlichen Kritikalität und Häufigkeit der verschiedenen Übergangsbereiche wurden die folgenden fünf Übergänge für die detaillierte Betrachtung ausgewählt:

1. Einfahren in die HLS   
*da hohe erwartete Häufigkeit*
2. Verlassen der HLS   
*da hohe erwartete Häufigkeit und auch höchste Relevanz gemäss Einschätzung der Begleitkommission (BK) zum Forschungsvorhaben*
3. Aktivierung der Fahrstreifensteuerung   
*da damit verbundene Fragen zu beschränkten Fahrstreifennutzungen von Interesse sind*
4. Wechsel des Verkehrszustandes   
*da damit verbundene Fragen zur allfälligen Übergabepflicht von Interesse sind*
5. Witterungswechsel auf "schlecht"   
*da grosse Risiken*

## 4 Analyse der räumlichen und zeitlichen Häufigkeit der Übergänge

In diesem Abschnitt wird die Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Auftretenshäufigkeit der fünf identifizierten Übergangstypen aus dem vorherigen Kapitel behandelt. Jeder Übergangstyp wird kurz beschrieben, gefolgt von Methodik und Ergebnissen zur Bestimmung der erwarteten Häufigkeit der Übergänge.

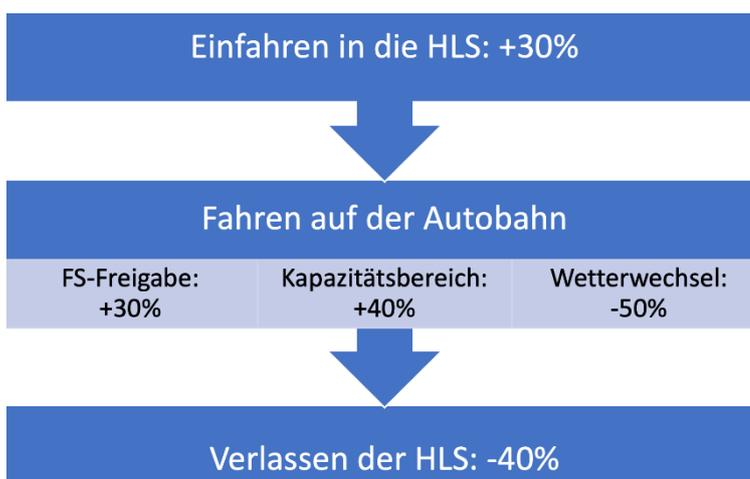
### 4.1 Vorgehensweise

Das Hauptziel besteht darin, die Anzahl der Übergänge pro Tag bzw. pro Jahr in der Schweiz zu ermitteln. Dabei wird sowohl die zeitliche Verteilung über den Tag und das Jahr als auch die räumliche Verbreitung dieser Übergänge untersucht. Zunächst wurden diverse Szenarien definiert, die als Grundlage für die Analyse der entsprechenden Daten dienen.

Es kann angenommen werden, dass nicht alle Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen (AF) auch wann immer möglich automatisiert fahren, sondern die Fahrer/-innen je nach Situation entscheiden. Daher wurden für die nachfolgenden Betrachtungen die folgenden Überlegungen angestellt. Diese Grössen basieren auf der Einschätzung von Experten und Expertinnen.

- Unmittelbar nach Einfahrt auf die Autobahn aktivieren 30% der hochautomatisierten Fahrzeuge die automatisierten Fahrfunktionen.
- Bei entsprechender Fahrstreifenfreigabe aktivieren zusätzliche 30% die AF.
- Bei sehr dichtem Verkehr (nahe der Kapazitätsgrenze, z.B. im Staufall) aktivieren zusätzliche 40% die AF.
- Bei Wetterwechsel auf "schlecht" (Sensorik kann das Fahrzeug unter Umständen nicht mehr allein steuern) fahren 50% der hochautomatisierten Fahrzeuge automatisiert, die dann an die manuelle Steuerung zurückübergeben.
- Unmittelbar vor Verlassen der Autobahn fahren 40% automatisiert, die dann auf manuelle Steuerung wechseln.

Das Verlassen der Autobahn ist im Gegensatz zum Wetterwechsel ein vorhersehbares Ereignis, bei dem der/die Fahrer/-in auch bereits einige Ausfahrten vorher in den manuellen Modus wechseln könnte. Abb. 12 stellt die Annahmen grafisch dar.



**Abb. 12** Anteil automatisierter Fahrzeuge, die automatisierte Fahrfunktionen aktivieren

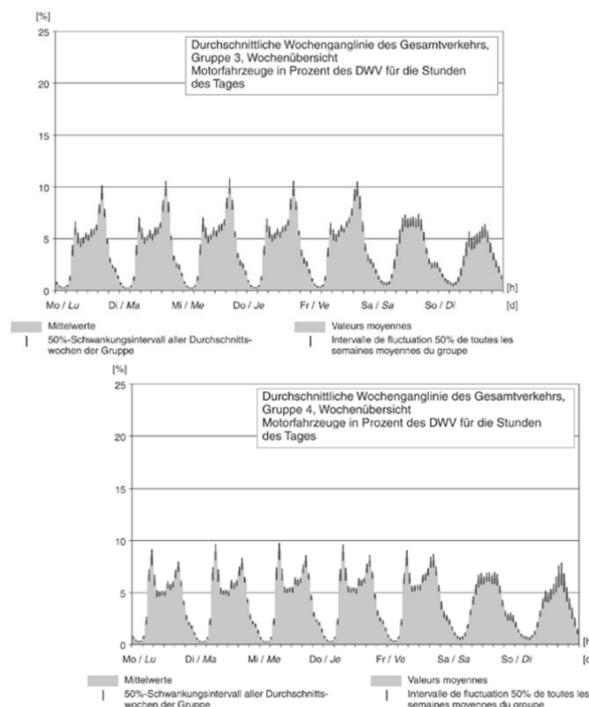
Im weiteren Verlauf der Projektbearbeitung wurden diese Werte als realistisch betrachtet. Um der Unsicherheit gegenüber dem zukünftigen Nutzungsverhalten von AF Rechnung zu tragen, wird neben dem oben beschriebenen Szenario zusätzlich ein Szenario betrachtet,

bei dem wann immer möglich automatisiert gefahren wird. Demnach ergeben sich die folgenden Übergabeszenarien:

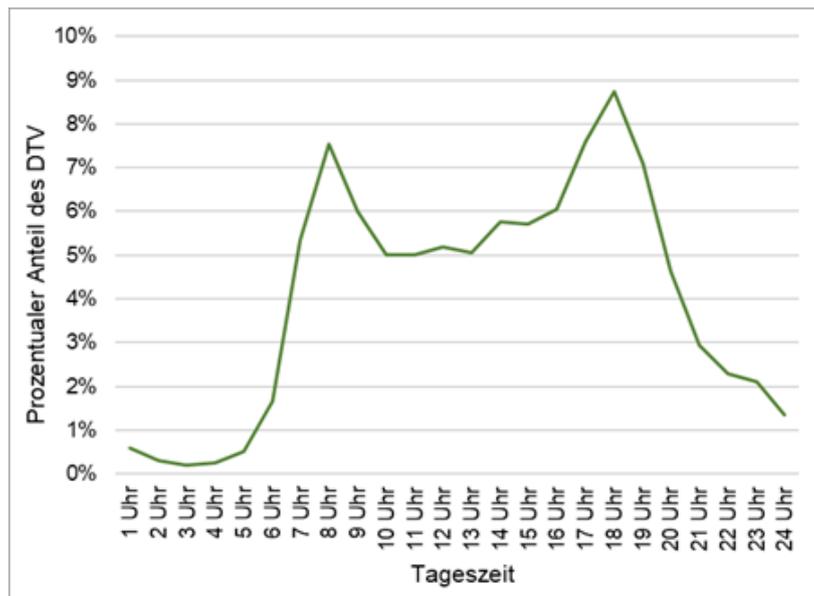
- Unmittelbar nach Einfahrt auf die Autobahn aktivieren 100% der hochautomatisierten Fahrzeuge die AF.
- Bei entsprechender Fahrstreifenfreigabe finden keine zusätzlichen Aktivierungen statt, da bereits alle hochautomatisierten Fahrzeuge die AF aktiviert haben.
- Bei sehr dichtem Verkehr (nahe der Kapazitätsgrenze, z. B. im Stau) finden keine zusätzlichen Aktivierungen statt, da bereits alle hochautomatisierten Fahrzeuge die AF aktiviert haben.
- Bei Wetterwechsel auf "schlecht" (Sensorik kann das Fahrzeug unter Umständen nicht mehr allein steuern) fahren 100% der hochautomatisierten Fahrzeuge automatisiert, die dann an die manuelle Steuerung zurückübergeben.
- Unmittelbar vor Verlassen der Autobahn fahren 100% automatisiert, die dann auf manuelle Steuerung wechseln.

## Datengrundlagen

**Verkehrsaufkommen:** Als Datengrundlage für das Verkehrsaufkommen wurde das Nationale Personenverkehrsmodell (NPVM) [12] von 2017 genutzt. Mit dem Datensatz des Personenverkehrsmodells lässt sich das durchschnittliche Verkehrsaufkommen je Tag (DTV) auf einzelnen Strassenabschnitten betrachten. Um einen zeitlichen Verlauf des Verkehrsaufkommens über den Tag abzuschätzen, wurden zusätzlich die typischen Ganglinien gemäss der Norm VSS-40005 "Verkehrserhebungen: Ganglinien und durchschnittlicher werktäglicher Verkehr" [22] berücksichtigt. Dabei wurden die Streckenabschnitte aus dem Verkehrsmodell an sieben verschiedenen Zählstellentypen aus der Norm zugeordnet, die jeweils charakteristischen Tages- und Wochenganglinien aufweisen. Etwa zwei Drittel der Zählstellen sind den Wochenganglinien Gruppe 3 (Pendlerverkehr mit starker Abendspitze) und 4 (Pendlerverkehr mit stärkerer Morgenspitze zuzuordnen (siehe Abb. 13). Damit lässt sich vereinfachend eine Tagesganglinie für die Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Übergänge erstellen, welche sich aus den typischen Tagesganglinien für einen repräsentativen Werktag (in diesem Fall wurde der Dienstag verwendet) als Mittelwert aus Gruppe 3 und Gruppe 4 ergibt (siehe Abb. 14). Der Einfachheit halber wird diese Tagesganglinie im Folgenden für alle HLS-Abschnitte und Rampen angenommen. Der DTV-Wert stammt jeweils aus dem NPVM.



**Abb. 13** Wochenganglinien Gruppe 3 (links) und 4 (rechts) Quelle: VSS 40 005 [22]



**Abb. 14** Tagesganglinie, eigene Darstellung, Quelle: VSS 40 005 [22]

*Zusätzliche Fahrstreifen für die dynamische Fahrstreifenfreigabe:* Zusätzliche Fahrstreifen für die dynamische Fahrstreifenfreigabe wurden aus der Engpassbeseitigung Nationalstrassennetz mit Zeithorizont 2050 verwendet.

*Stau / Stockender Verkehr:* Die Ermittlung der Kapazitäts- und Stauereignisse wurde auf Basis der Staustunden aus dem Jahr 2017 vorgenommen.

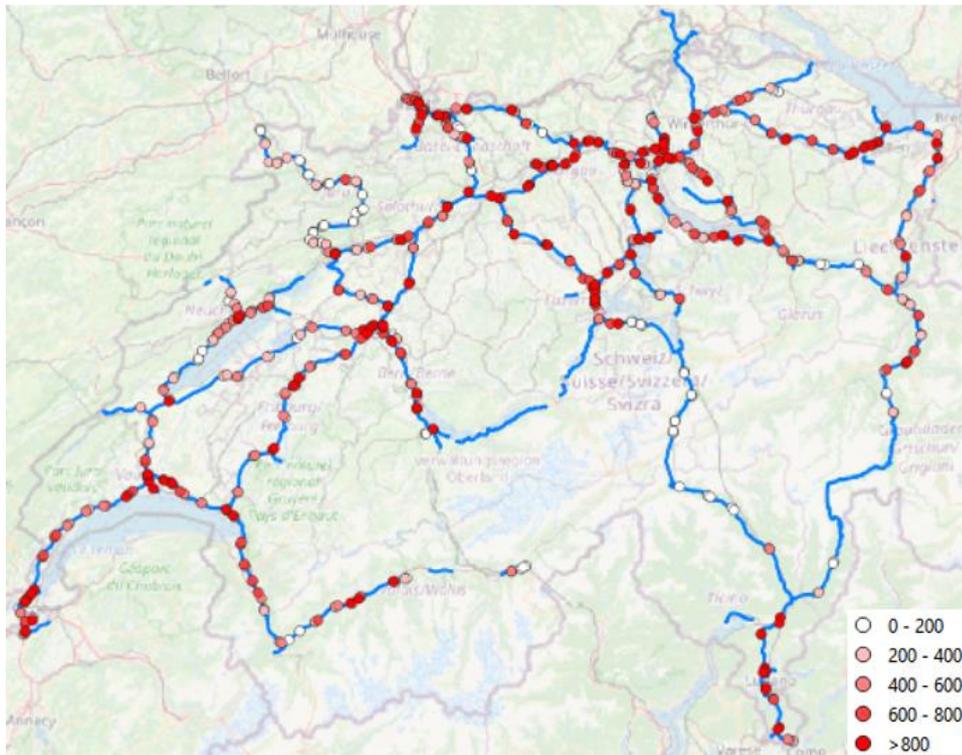
*Wetterveränderungen:* Wetterdaten wurden basierend auf dem Datensatz Meteo-Schweiz Combiprecip (CPC) „Hourly Precipitation Estimation through Rain-Gauge and Radar“ von 2017 ermittelt.

## 4.2 Übergangstyp 1: Einfahren in die HLS

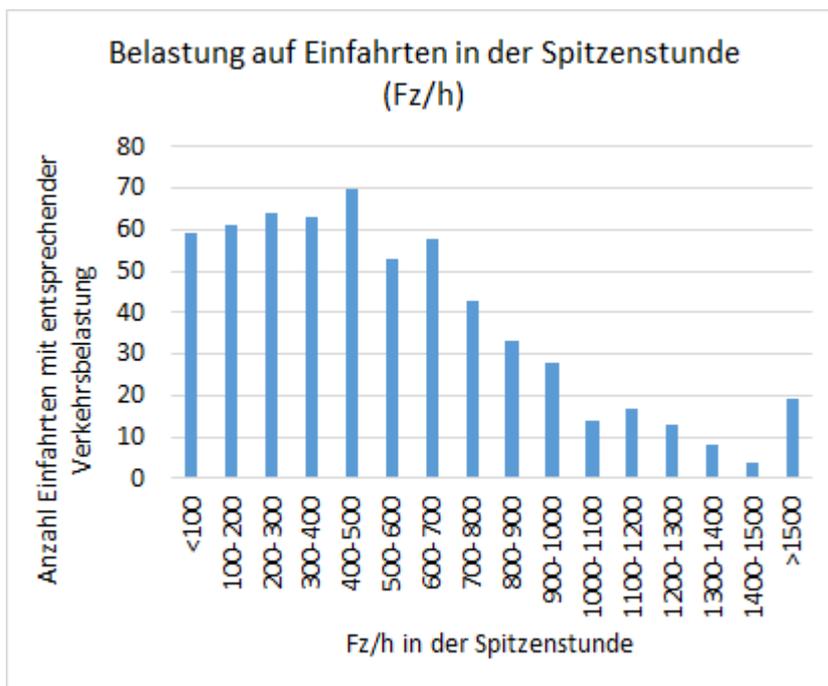
Beim Einfahren in die HLS geht es darum, dass Fahrzeuge ausserhalb der Autobahn manuell gesteuert werden und beim Einfahren im Verlauf der Auffahrtsrampe die AF einschalten. Dieser Übergangstyp wird untersucht, da er eine hohe erwartete Häufigkeit aufweist.

### Vorgehensweise

Die Datengrundlage ist das Nationale Personenverkehrsmodell von 2017. Abb. 15 zeigt die Belastung der Rampen entlang der Nationalstrassen in Fahrzeugen pro Stunde (Fz/h).



**Abb. 15** Übersicht Rampen Einfahrt, eigene Darstellung auf Basis NPVM [12], Belastung in Fz/h



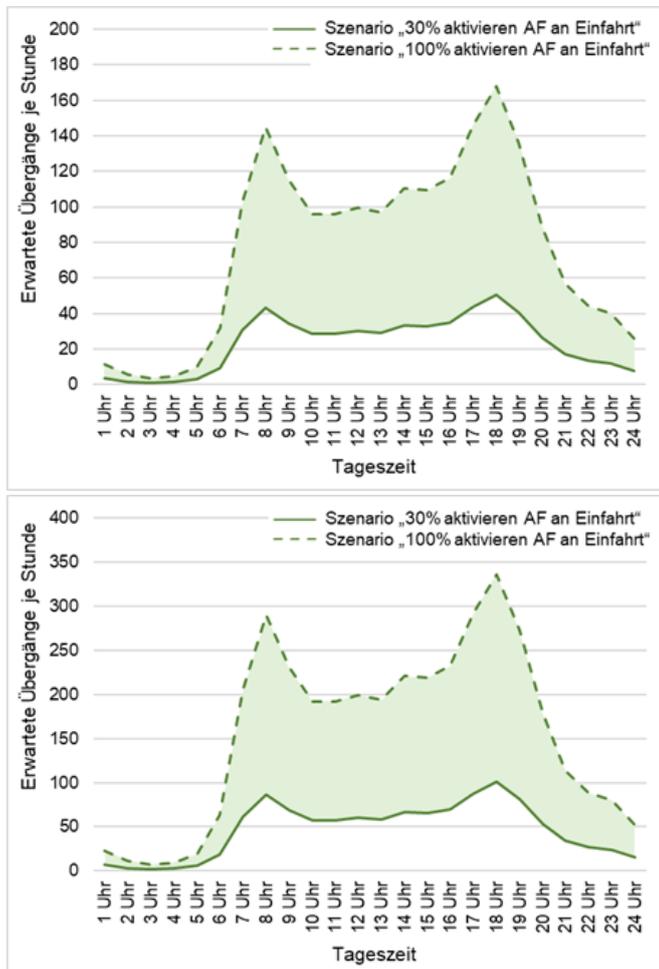
**Abb. 16** Belastung Einfahrten Spitzenstunde, eigene Darstellung auf Basis NPVM [12]

Durchschnittlich haben Einfahrten in der Spitzenstunde eine Belastung von ca. 560 Fz/h. Der maximale Verkehrsfluss wird am Flughafen Zürich mit ca. 2'700 Fz/h erreicht.

### Resultate

In Szenario 1 mit einer Durchdringungsrate automatisierter Fahrzeuge von 30% ergeben sich pro Tag je Einfahrt ca. 600 Übergänge, d.h. pro Tag insgesamt ca. 335'000 Übergänge. Im Extremfall von 100% aktivierten automatisierten Fahrfunktionen bei Einfahrt in die HLS ergeben sich 1,12 Mio. zu erwartende Übergänge.

In Szenario 2 mit einer Durchdringungsrate von 60% ergeben sich dementsprechend ca. 1'200 Übergänge pro Tag je Einfahrt und ca. 670'000 Übergänge insgesamt pro Tag. Analog ergeben sich für den Extremfall 2,233 Mio. zu erwartende Übergänge. Abb. 17 führt die Resultate über den Tagesverlauf auf.



**Abb. 17** Übergang 1 im Tagesverlauf mit Durchdringungsraten von 30% oben und 60% unten (eigene Darstellung)

### 4.3 Übergangstyp 2: Verlassen der HLS

Als zweiter Übergangstyp wird das Verlassen der HLS untersucht. Dabei geht es darum, dass Fahrzeuge auf der Autobahn automatisiert fahren und bei Befehlen des nachgeordneten Netzes auf die manuelle Steuerung wechseln. Dieser Übergangstyp wird untersucht, da er ebenfalls, wie auch das Einfahren in die HLS, eine hohe erwartete Häufigkeit hat.

#### Vorgehensweise

Auch beim Verlassen der HLS ist analog zum Einfahren die Grundlage das Nationale Personenverkehrsmodell von 2017. Folgende Abb. 18 zeigt die Belastung der Rampen entlang der Nationalstrassen in Fz/h.

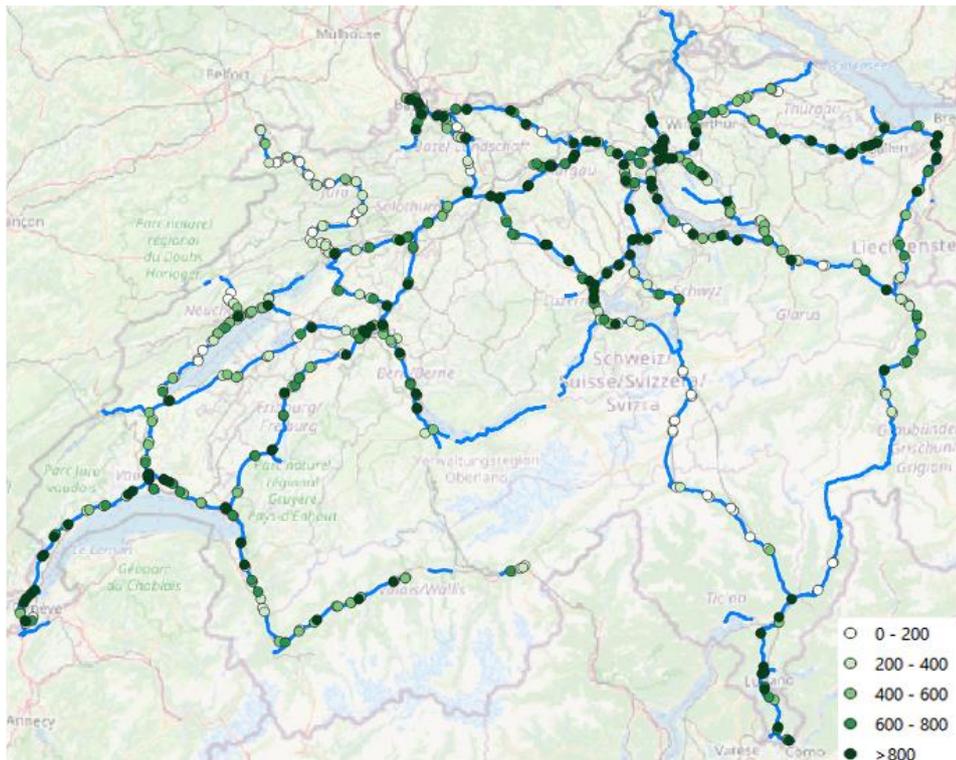


Abb. 18 Rampen Ausfahrten, eigene Darstellung auf Basis NPVM [12], Belastung in Fz/h

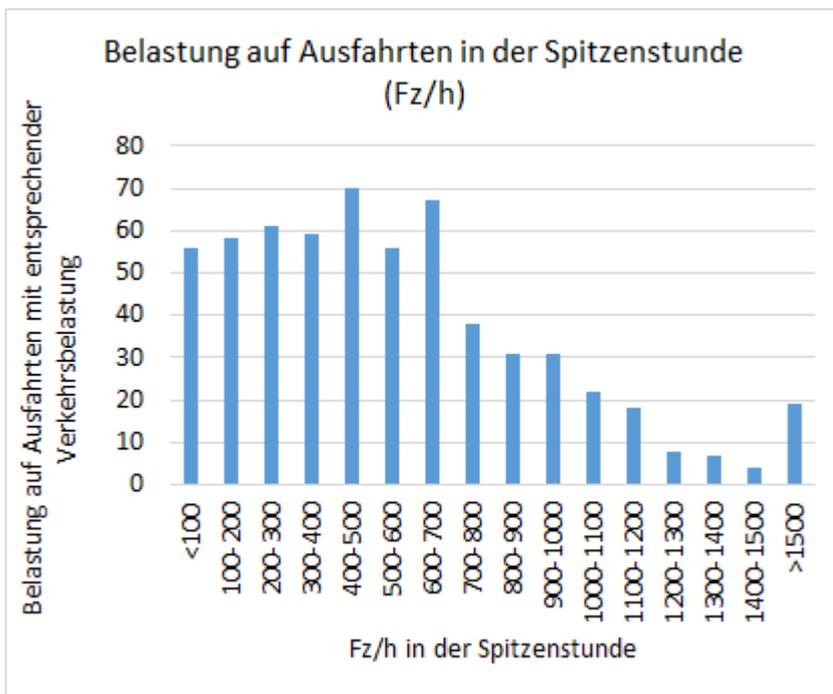


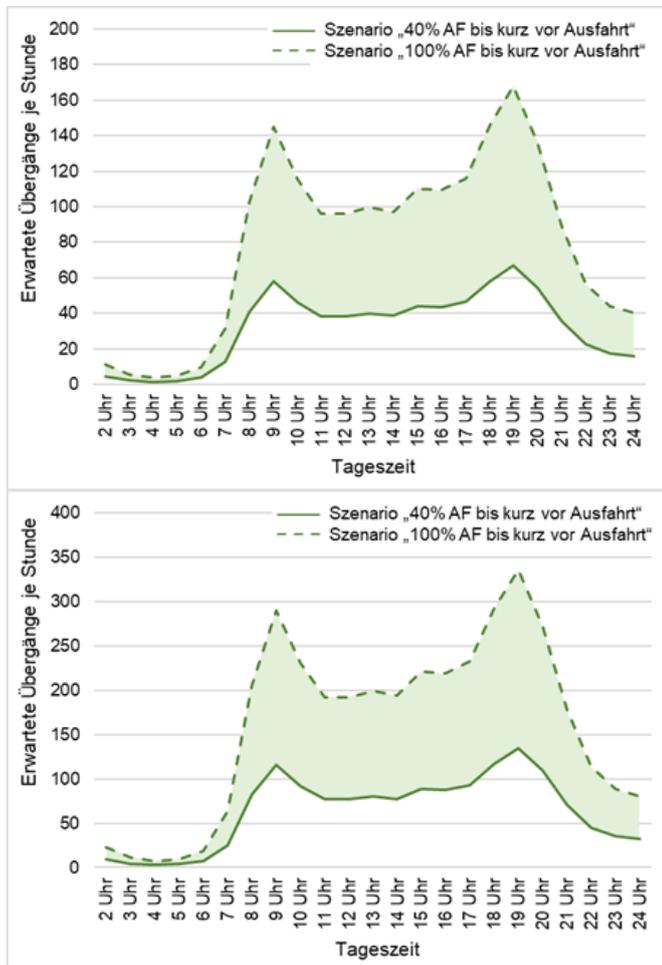
Abb. 19 Belastung Ausfahrten Spitzenstunde, eigene Darstellung auf Basis NPVM [12]

Durchschnittlich haben Ausfahrten in der Spitzenstunde eine Belastung von ca. 560 Fz/h (Abb. 19). Der maximale Verkehrsfluss wird am Flughafen Genf mit ca. 2'200 Fz/h erreicht.

### Resultate

In Szenario 1 mit 30% Durchdringungsrate ergeben sich pro Tag je Ausfahrt ca. 800 Übergänge, d.h. pro Tag insgesamt ca. 450'000 Übergänge. Im Extremfall mit 100% aktivierten automatisierten Fahrfunktionen ergeben sich 1'125'000 Übergänge beim Verlassen der HLS.

In Szenario 2 mit 60% Durchdringungsrate ergeben sich analog ca. 1'500 Übergänge pro Tag je Ausfahrt und ca. 900'000 Übergänge insgesamt pro Tag. Analog ergeben sich im Extremfall 2'250'000 Übergaben pro Tag. In Abb. 20 zeigt die grüne Linie die Werte bei 40% Aktivierung der automatisierten Fahrfunktionen, die grün gestrichelte Linie analog 100% Aktivierung.



**Abb. 20** Übergang 2 im Tagesverlauf mit Durchdringungsraten von 30% oben und 60% unten (eigene Darstellung)

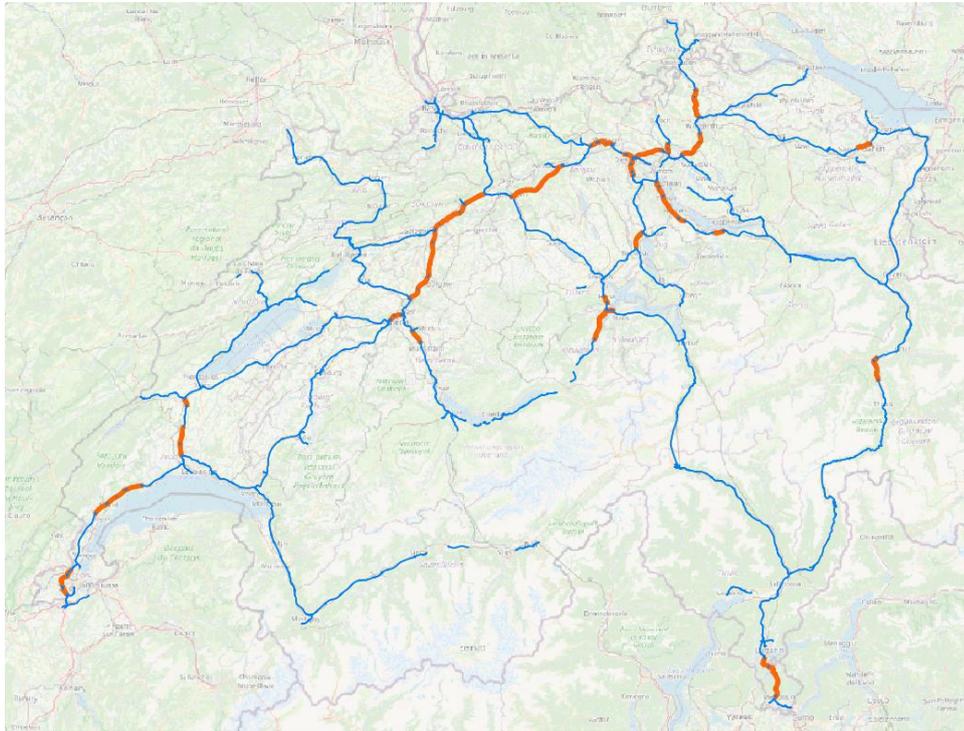
#### 4.4 Übergangstyp 3: Aktivierung der Fahrstreifensteuerung

Im Rahmen der Aktivierung der Fahrstreifensteuerung wird angenommen, dass zusätzliche Fahrstreifen freigegeben werden, welche ausschliesslich automatisierten Fahrzeugen vorbehalten bleiben. Die Fahrstreifensteuerung wird dabei nicht als Mittel für die Freigabe des Pannestreifens betrachtet, der womöglich für den risikominimalen Zustand genutzt werden muss.

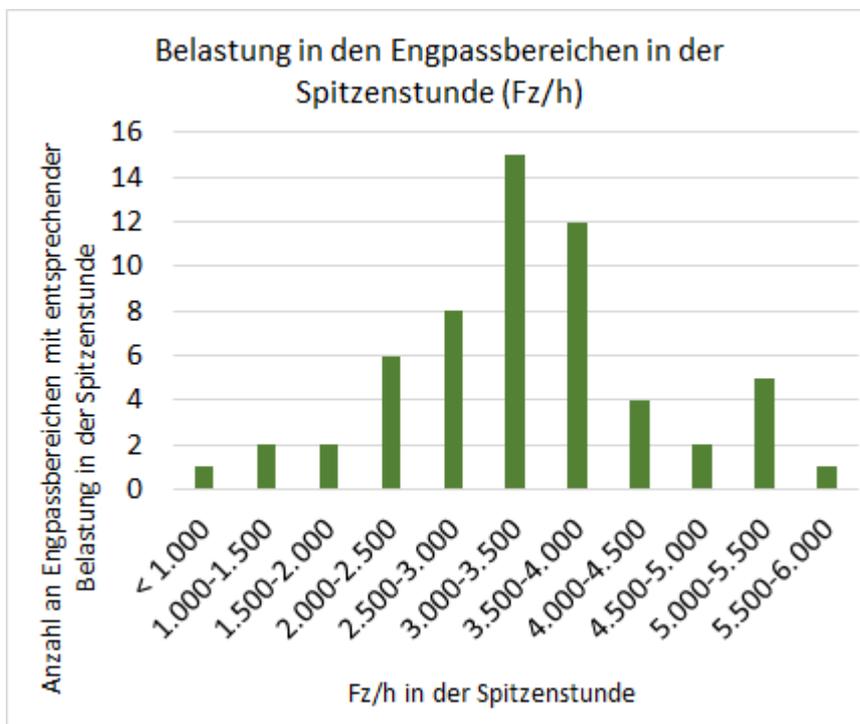
##### Vorgehensweise

Es werden diejenigen Abschnitte untersucht, die im Rahmen des Engpassbeseitigungsprogramms des Bundes [17] bis 2050 ausgebaut werden sollen (vgl. orange eingefärbte Abschnitte in Abb. 21). Dies sind Abschnitte des Nationalstrassennetzes, bei denen davon auszugehen ist, dass sie bis 2050 deutlich überlastet sein werden. Dementsprechend hat der Bund beschlossen, diese mit zusätzlichen Fahrstreifen auszubauen. Es handelt sich dabei primär um zusätzliche (reguläre) Fahrstreifen und nicht um umgenutzte Pannestreifen. Zu den Pannestreifenumnutzungen ist ein separates Programm beim ASTRA vorhanden. Als

Berechnungsgrundlage für die Anzahl der Übergänge werden die aktuellen Belastungszahlen der zu erweiternden HLS-Abschnitte (laut NPVM) verwendet.



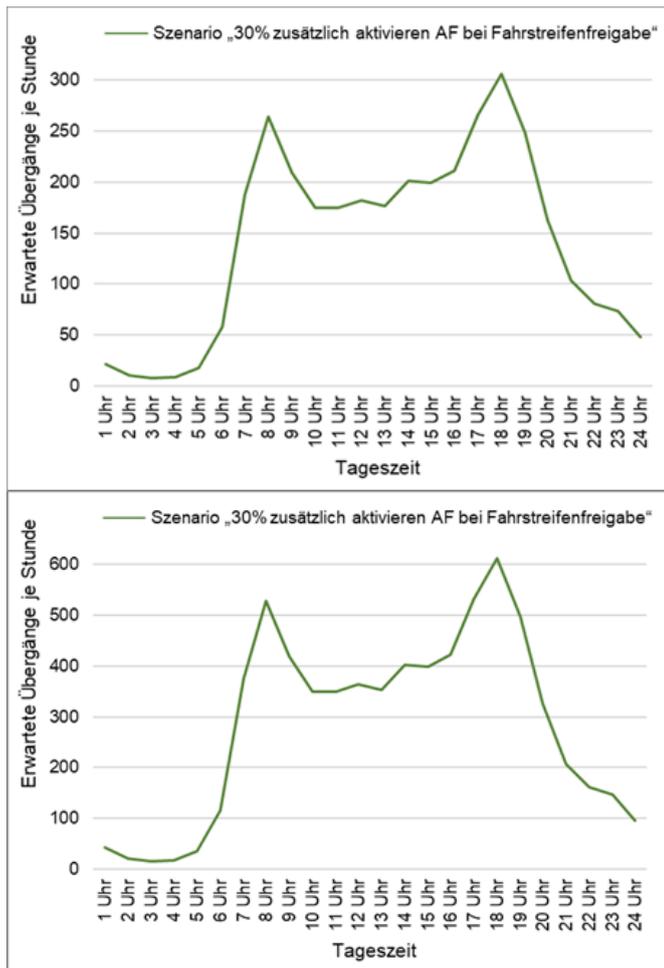
**Abb. 21** Auszubauende Abschnitte gemäss Programm Engpassbeseitigung [17]



**Abb. 22** Belastung in Engpassbereichen, eigene Darstellung auf Basis NPVM [12]

Abb. 22 stellt die Belastung in den Engpassbereichen in der Spitzenstunde in Fz/h dar. Der Durchschnitt liegt bei ca. 3'400 Fz/h.

## Resultate



**Abb. 23** Übergang 3 im Tagesverlauf mit Durchdringungsraten von 30% oben und 60% unten.

Szenario 1 mit 30% Durchdringungsrate zeigt pro Tag je Ausbaubereich ca. 3'400 Übergänge und damit insgesamt ca. 195'000 Übergänge pro Tag. Szenario 2 mit 60% Durchdringung an automatisierten Fahrzeugen weist etwa 6'800 Übergänge je Ausbaubereich pro Tag und ca. 390'000 Übergänge insgesamt pro Tag auf. In beiden Fällen sind im Extremfall mit 100% Aktivierung der automatisierten Fahrfunktionen keine Übergänge bei Fahrstreifenfreigaben zu erwarten, da bereits alle Fahrzeuge automatisiert fahren. Abb. 23 stellt die Verteilung über den Tag dar.

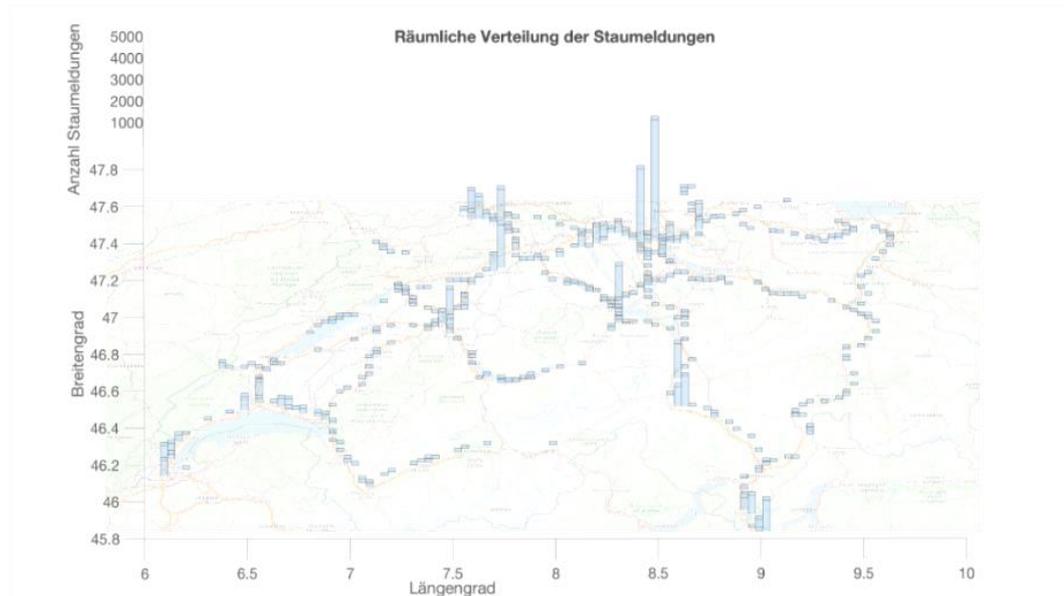
## 4.5 Übergangstyp 4: Wechsel des Verkehrszustandes

Als vierter Übergangstyp wurde der Wechsel des Verkehrszustands auf "Stau"/"stockenden Verkehr", das heisst, nahe des Kapazitätsmaximums, gewählt. Die Idee ist, dass Fahrzeuge im Stau auf der Autobahn nicht manuell gesteuert werden sollten, um durch optimierte Fahrzeugfolgeabstände die Kapazität des betroffenen Autobahnabschnitts zu erhöhen. Dieser Übergang ist dynamisch (nicht an einen festen Ort gebunden wie die vorigen drei Übergangstypen) und daher nur bedingt erwartbar.

### Vorgehensweise

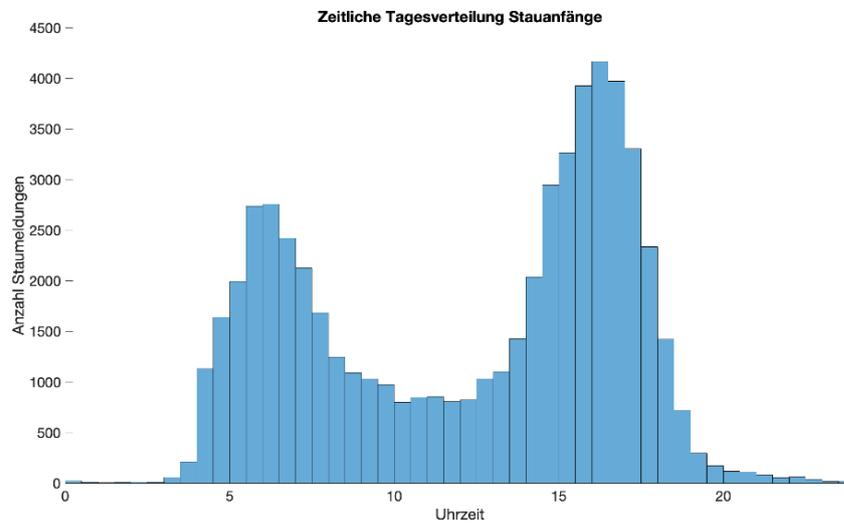
In den Daten der Staustunden von 2017 gibt es ca. 42'000 Meldungen von Autobahnen, davon ca. 16'000 "Stau" und ca. 26'000 "stockender Verkehr". Im Folgenden werden all diese Meldungen gemeinsam als "Stau"/"Störung" bezeichnet.

Als Ursachen für die Störungen wurden in ca. 80% der Fälle Überlastung angegeben, in ca. 20% war ein Unfall der Grund. Insgesamt ca. 1,6% der Störungen geben als Grund eine Baustelle, einen Brand, eine Panne oder Unwetter an. Abb. 24 zeigt die räumliche Verteilung der Staumeldungen.

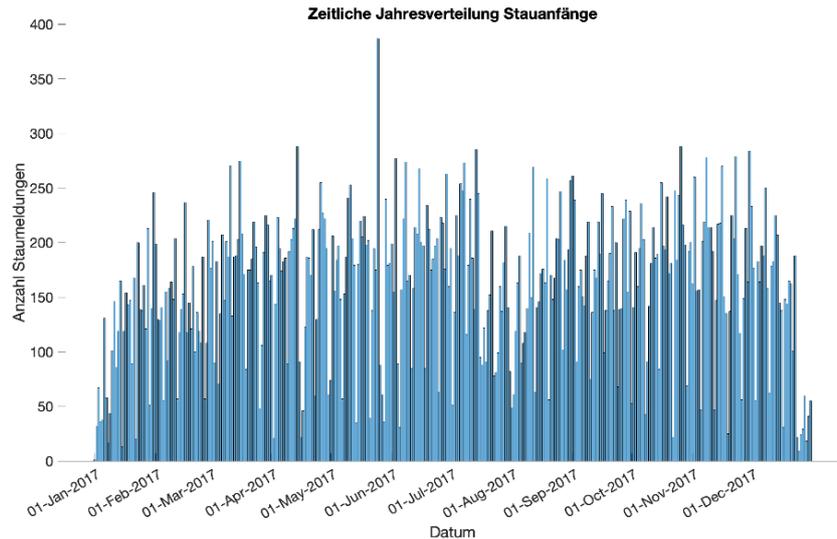


**Abb. 24** Räumliche Verteilung Staumeldungen Nationalstrasse (eigene Darstellung)

Die zeitlichen Tages- und Jahresverteilungen der Staumeldungen sind in Abb. 25 bzw. Abb. 26 dargestellt.

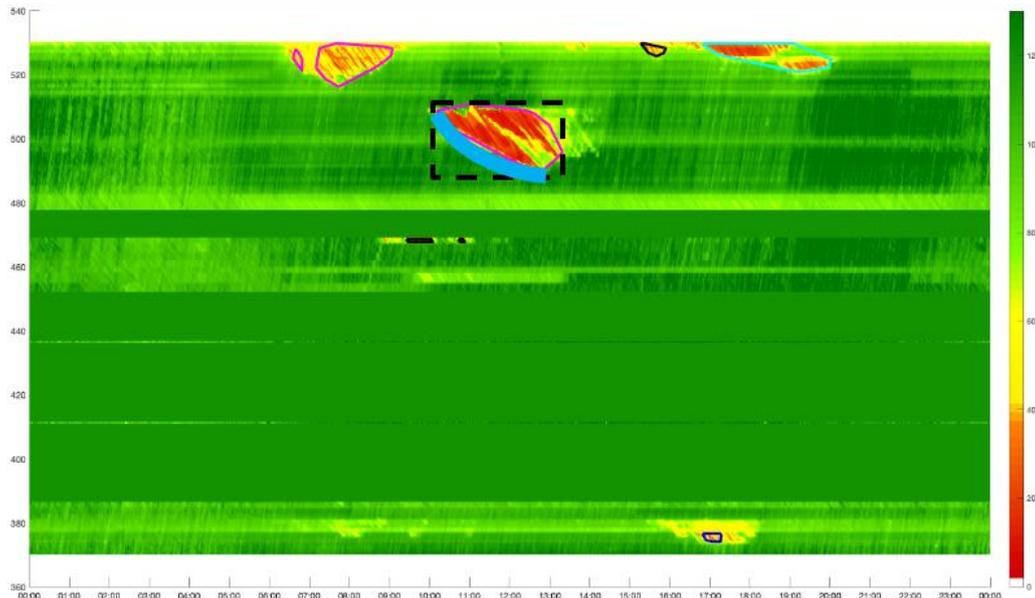


**Abb. 25** Tagesverteilung der Staumeldungen (eigene Darstellung)



**Abb. 26** Jahresverteilung der Staumeldungen (eigene Darstellung)

Für die Analysen wurde jeweils der zeitliche Beginn der Störfälle und diesbezüglich der Kapazitätsbereich ermittelt. Über die zeitlichen und räumlichen Start- und Endzeiten der Meldungen wurden die "Maximalgrenzen" einer Störung abgeschätzt. Abb. 27 zeigt ein schwarz gestricheltes Rechteck um eine Störungsmeldung (dargestellt in Rot, Geschwindigkeit unterhalb eines Grenzwertes, bspw. 40 km/h). Die blaue Linie stellt den zeitlichen Beginn der Störung entlang des Autobahnabschnitts dar. Etwa 60% der Fläche eines solchen Rechtecks sind üblicherweise rot, d.h. als Störung einzustufen und nicht als Freifluss. Die Fläche dieses Rechtecks wird daher zu 60% als Staugrösse zur Abschätzung der räumlich-zeitlichen Auswirkungen genommen.



**Abb. 27** Zeitlich-räumliche Darstellung einer Geschwindigkeitsverteilung entlang eines Autobahnabschnitts (eigene Darstellung)

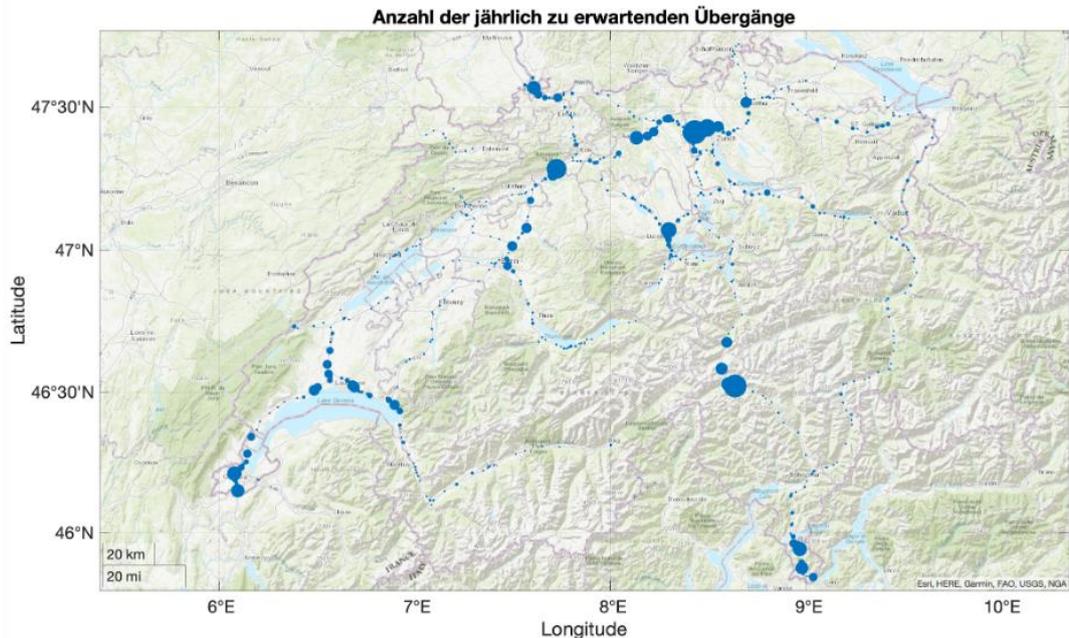
## Resultate

Die Störungsverteilung wurde mit der Tagesganglinie skaliert, um die Verkehrsnachfrage zu ermitteln. Die Ergebnisse zeigen, dass am stauanfälligsten Ort 3,9 Mio. Fahrzeuge pro Jahr einfahren. Dies entspricht einer durchschnittlichen täglichen Anzahl von ca. 10'700 Fahrzeugen. Über alle Orte in der Schweiz sind dies etwa 56,14 Mio. Einfahrten pro Jahr und 153'800 Einfahrten pro Tag.

In Szenario 1 mit einer Durchdringungsrate von 30% sind ca. 18'500 Übergänge pro Tag aufgrund des Wechsels des Verkehrszustandes zu erwarten. In Szenario 2 mit einer Durchdringungsrate von 60% sind ca. 36'900 Übergänge pro Tag zu erwarten.

In beiden Fällen sind im Extremfall mit 100% Aktivierung der automatisierten Fahrfunktionen keine Übergänge bei Fahrstreifenfreigaben zu erwarten, da bereits alle Fahrzeuge automatisiert fahren.

Abb. 28 stellt die räumliche Verteilung der zu erwartenden Übergänge dar. Je grösser der blaue Kreis an einem Ort ist, desto mehr Übergänge sind dort zu erwarten.



**Abb. 28** Räumliche Verteilung der Übergänge (eigene Darstellung)

## 4.6 Übergangstyp 5: Witterungswechsel auf "schlecht"

Als letzter Übergangstyp wurde der Witterungswechsel gewählt. Bei einem Wetterwechsel auf "schlecht" (z. B. Sturm, Schnee, Eis, Hagel, Starkregen etc.) ist davon auszugehen, dass die Sensorik am Fahrzeug nicht mehr vollumfänglich funktioniert und der manuelle Steuerungsmodus aktiviert werden sollte. Wie auch beim Kapazitätsbereich ist dieser Übergang dynamisch (nicht an einen festen Ort gebunden) und daher nur bedingt erwartbar.

### Vorgehensweise

Für den Übergangstyp "Witterungswechsel auf schlecht" wurden die Niederschlagsdaten aus dem Jahr 2017 an 2'535 Orten analysiert. Diese enthalten die stündlichen Niederschlagswerte in mm/h. Die zeitliche und die räumliche Streuung der Niederschläge, insbesondere von Starkregen ist sehr gross. Als Grenzwert für "schlechtes Wetter" wurden die Schwellenwerte, wie sie vom Deutschen Wetterdienst und von Meteo-Schweiz veröffentlicht werden, genutzt. Der DWD gibt für Starkregen 25 l/qm/h<sup>1</sup>, Meteo-Schweiz 30 mm/h<sup>2</sup> als Grenzwert an. Expertengespräche suggerierten einen niedrigeren zu erwartenden Grenzwert. Daher wurde eine Sensitivitätsanalyse mit drei verschiedenen Grenzwerten durchgeführt: 10, 15 und 25 mm/h. Weitere Informationen sind der Literatur zu entnehmen, bspw. [61, 62, 63, 64, 65, 66, 67].

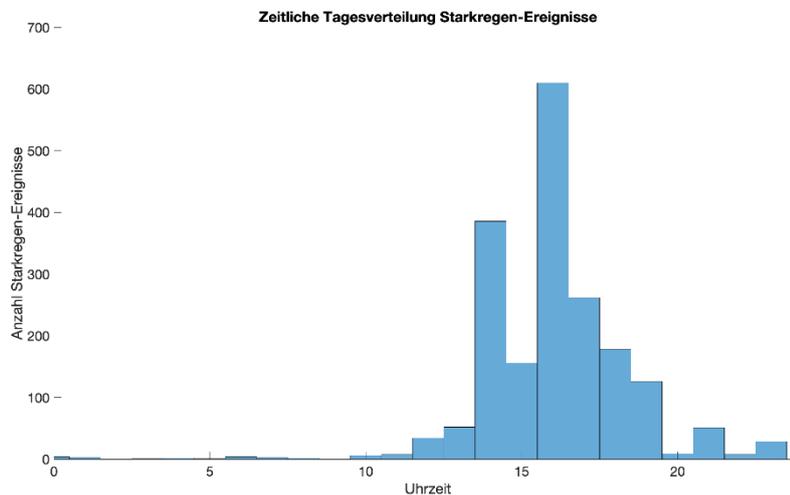
Insgesamt wurden aus dem Jahr 2017 mehrere Tausend Schlechtwetterereignisse analysiert (abhängig vom Schwellwert). Nahezu alle Ereignisse dauerten max. eine Stunde an. Diese

<sup>1</sup> Quelle: [https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen\\_aktuell/kriterien/warnkriterien.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html).

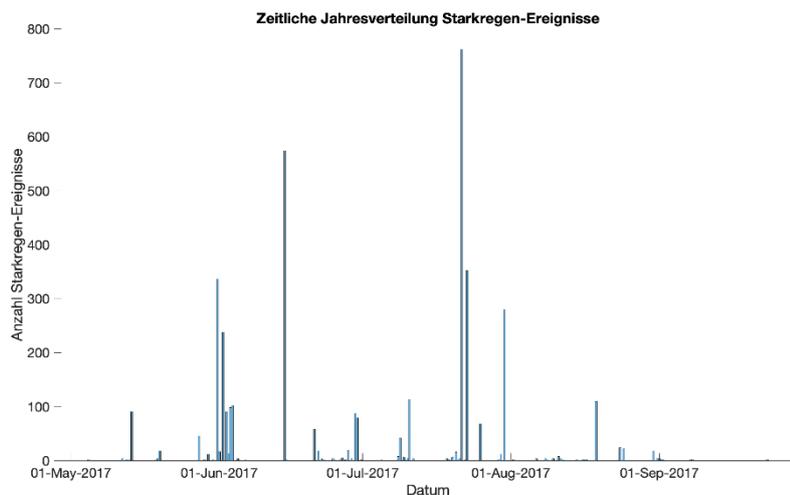
<sup>2</sup> Quelle: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/gefahren/erlaeuterungen-der-gefahrenstufen/gewitter.html>.

traten an 42 verschiedenen Orten auf und wurden wieder mit der Nachfrageganglinie überlagert. Analog zur Betrachtung des Kapazitätsbereichs wurden auch hier die Anzahl der in den Schlechtwetterbereich einfahrenden Fahrzeuge betrachtet (Übergang AF aktiv -> manuelle Steuerung).

Abb. 29 und Abb. 30 stellen die zeitliche Verteilung der Starkregen-Ereignisse pro Tag und pro Jahr dar.



**Abb. 29** Tagesverteilung Starkregen (eigene Darstellung)



**Abb. 30** Jahresverteilung Starkregen (eigene Darstellung)

## Resultate

Die Ergebnisse wurden mit drei verschiedenen Grenzwerten für Starkregen-Ereignisse ermittelt (10, 15 und 25 mm/h). Im Folgenden werden die Ergebnisse getrennt nach Schwellwert dargestellt.

Bei einem Grenzwert von 10 mm/h zeigt die Analyse der knapp 5'000 Schlechtwetterereignisse, dass den am häufigsten betroffenen Ort pro Jahr 11 Ereignisse ereilen. Dies entspricht ca. 82'700 zu erwartenden Übergängen pro Jahr. Gemittelt über Tage mit schlechter Witterung ergeben sich ca. 2'300 Übergänge pro Tag an diesem Ort. Über alle untersuchten Orte ergeben sich durchschnittlich 1'720 Einfahrten in Schlechtwettergebiete pro Tag.

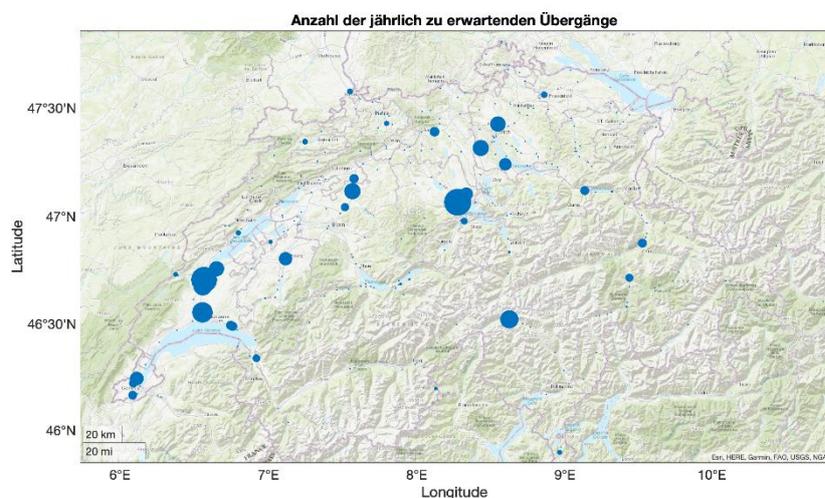
Analog gibt es bei einem Grenzwert von 15 mm/h knapp 2'000 Schlechtwetterereignisse, die sich auf 31 Orte verteilen. Der am häufigsten betroffene Ort erlebte im Jahr 2017 gut 2'400 Übergänge pro Tag und ca. 58'700 Übergänge pro Jahr. Über alle untersuchten Orte ergeben sich durchschnittlich 700 Einfahrten in Schlechtwettergebiete pro Tag.

Bei einem Grenzwert von 25 mm/h ereigneten sich ca. 330 Schlechtwetterereignisse, verteilt auf 12 Orte. Der am stärksten betroffene Ort erfuhr jährlich ca. 19'600 Übergänge, täglich ca. 1'800 Übergänge. Über alle untersuchten Orte ergeben sich durchschnittlich 170 Einfahrten in Schlechtwettergebiete pro Tag.

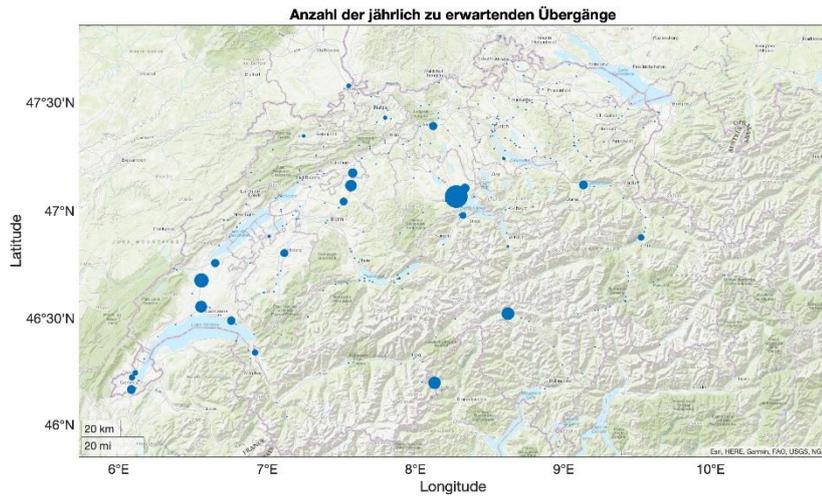
Bei einer Durchdringungsrate von 30% (Szenario 1) und einer Aktivierungsquote der automatisierten Fahrfunktionen von 50% entspricht dies ca. 260 bzw. 105 bzw. 25 Übergängen pro Tag, bei den jeweiligen Grenzwerten von 10, 15 und 25 mm/h.

Im Extremfall der 100% aktivierten automatisierten Fahrfunktionen entspricht dies doppelt so vielen Übergängen, d.h. 520 bzw. 210 bzw. 50 Übergängen pro Tag. In Szenario 2, der Durchdringungsrate von 60%, sind bei einer Aktivierungsquote von 50% ebenso viele Übergänge zu erwarten. Im Extremfall sind wiederum doppelt so viele Übergänge zu erwarten, d.h. 1'030 bzw. 420 bzw. 100 Übergänge pro Tag.

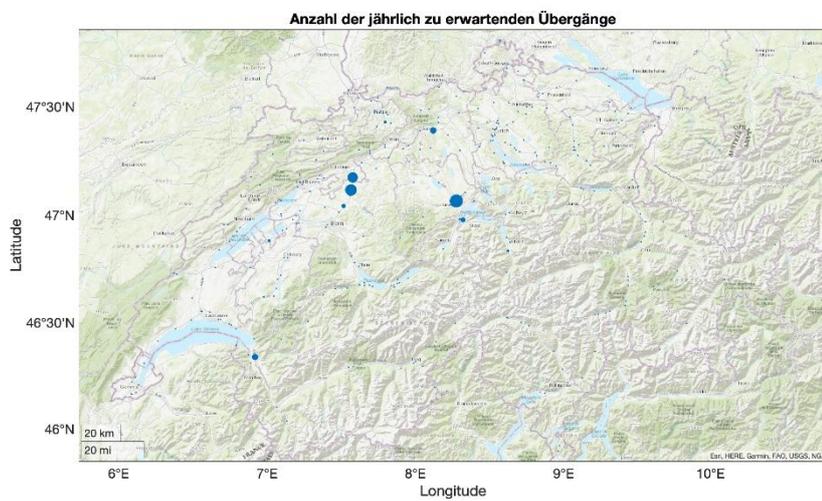
Für die Zusammenfassung im folgenden Abschnitt wurde der mittlere Grenzwert, d.h. 15 mm/h für das Auftreten von Starkregen gewählt. Es lässt sich aber klar sagen, dass Starkregen ein sehr selten auftretendes Ereignis ist und mit zunehmender Technologieverbesserung in den nächsten Jahren sogar gar nicht mehr als Übergabegrund an den Fahrer/die Fahrerin zu erwarten ist. Abb. 31 bis Abb. 33 zeigen die zu erwartende räumliche Verteilung der Übergänge abhängig vom gewählten Grenzwert für Schlechtwetterereignisse.



**Abb. 31** Räumliche Verteilung Übergänge bei einem Grenzwert von 10 mm/h



**Abb. 32** Räumliche Verteilung Übergänge bei einem Grenzwert von 15 mm/h



**Abb. 33** Räumliche Verteilung Übergänge bei einem Grenzwert von 25 mm/h

## 4.7 Übersicht Häufigkeit der Übergänge

Zusammenfassend lässt sich folgendes Resultat der geschätzten Anzahl an Übergängen festhalten. Bei allen Werten handelt es sich um Mittelwerte. Bei den Übergangstypen 1-4 dürfte die Streuung geringer sein als beim Übergangstyp 5, bei dem im Mittelwert auch Tage ohne Schlechtwetterereignisse abgebildet sind. An einem einzelnen Tag mit Schlechtwetterereignissen treten mehr Übergänge auf, als dies in der Tabelle dargestellt wird (vgl. Abschnitt 4.6).

		Summe Übergaben pro Tag			
		Szenario 1: Durchdringungsrate von 30%		Szenario 2: Durchdringungsrate von 60%	
		Normalszenario	Extremszenario: 100 % Aktivierung auf der HLS	Normalszenario	Extremszenario: 100 % Aktivierung auf der HLS
1.	Einfahren in die HLS 	335'000	1'120'000	670'000	2'233'000
2.	Verlassen der HLS 	450'000	1'125'000	900'000	2'250'000
3.	Aktivierung Fahrstreifensteuerung 	195'000	0	390'000	0
4.	Wechsel Verkehrszustand auf Kapazitätsbereich/Stau 	18'500	0	36'900	0
5.	Witterungswechsel auf «schlecht» 	105	210	210	420

**Abb. 34** Übersicht Übergänge (eigene Darstellung)

## 5 Anforderungen an Übergänge

Im folgenden Kapitel werden die Anforderungen, die eine Einführung des automatisierten Fahrens in der Schweiz zu erfüllen hat, festgehalten und strukturiert. Diese Resultate werden im Anschluss für die Beurteilung der Konzepte zu den Übergangsbereichen verwendet.

### 5.1 Grundlagen und wesentliche Aussagen

Anforderungen an das Verkehrssystem können nicht nur fachlich hergeleitet werden. Viele bzw. die meisten Aspekte gehen auf Werte und Normen zurück, die letztlich durch die Gesellschaft und die Politik festzulegen sind. Eine Leitschnur bilden Strategiedokumente der zuständigen Departemente und Ämter des Bundes. Diese sind thematisch ausdifferenziert und politisch legitimiert. Im Folgenden werden die strategischen Dokumente des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und des Bundesamts für Strassen (ASTRA) hinsichtlich Kriterien ausgewertet, die sich auf die vorliegenden Fragestellungen in Bezug auf das automatisierte Fahren beziehen können. Die Bearbeitung erfolgte im Juni 2023. Parallel überarbeitete das ASTRA die Amtsstrategie. Da die Publikation der Strategie später erfolgt, konnten diese Inhalte hier nicht berücksichtigt werden.

#### UVEK-Organisationsverordnung

Mit der Organisationsverordnung des UVEK (OV-UVEK) [2] hat der Bundesrat die Ziele, die Tätigkeiten und die Organisation des Departements festgelegt. Im Art. 10 Abs. 2 werden die Ziele des ASTRA beschrieben. Dazu gehören unter anderem die Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit des Nationalstrassennetzes und dessen Einbindung in das transeuropäische Strassennetz sowie die Verbesserung der Sicherheit aller am Strassenverkehr teilnehmenden Personen und Fahrzeuge. Diese beiden Punkte bilden die Basis für weitere Konkretisierungen.

#### UVEK-Orientierungsrahmen 2040

Vor dem Hintergrund des erwarteten Verkehrswachstums in der Schweiz hat das UVEK im Jahr 2017 einen "Orientierungsrahmen 2040" [6] erstellt, mit dem ämterübergreifend und vorausschauend den Herausforderungen begegnet werden soll. Mit einem Hauptziel und verschiedenen strategischen Zielformulierungen wurden Schwerpunkte gesetzt. Diese Ziele stellen den Orientierungsrahmen für alle im UVEK relevanten Geschäfte im Mobilitäts- und Verkehrsbereich dar.

Das Hauptziel lautet "Das Gesamtverkehrssystem der Schweiz 2040 ist in allen Aspekten effizient". Der Begriff Effizienz wird dabei weiter ausgeführt. Effizienz bedeutet die verfügbare Technik optimal einzusetzen, weniger finanzielle Mittel und natürlich Ressourcen zu verbrauchen und dadurch für die Gesellschaft einen maximalen Nutzen zu erzielen. Das Hauptziel wird schliesslich mit verschiedenen strategischen Zielen in unterschiedlichen Handlungsfeldern konkretisiert, vgl. Abb. 35. In Bezug auf die vorliegende Forschungsfrage sind vor allem drei Ziele relevant:

- Ziel 5: Die Verkehrsnachfrage soll so gelenkt werden, dass die bestehenden Leistungsfähigkeiten ausgeschöpft werden, bevor Aus- oder Neubauten des Strassennetzes erfolgen. Die Potenziale automatisierter Fahrzeuge in Bezug auf eine erhöhte Kapazität bzw. eine optimierte Auslastung der Infrastruktur sind folglich zu nutzen.
- Ziel 6: Das Gesamtverkehrssystem soll sicher, verlässlich, hoch verfügbar und einfach zugänglich sein. Die Sicherheit geniesst gemäss Orientierungsrahmen eine hohe Priorität, die Standards sollen aber nicht zusätzlich erhöht werden. Mit "Standards" sind keine operativen, technischen Bedingungen gemeint, vielmehr soll das hohe Sicherheitsniveau erhalten bleiben. Technische Innovationen sollen ihren positiven Einfluss voll entfalten können. Hierzu sind sicherheitsrelevante Daten zu vernetzen und zugänglich zu machen.

- Ziel 11: Die Verkehrsinfrastrukturen sollen flächen- und bodenschonend realisiert werden, sie sollen gut in Landschaft und Siedlungsräume integriert werden. Ihre Trennwirkung ist zu reduzieren. Insgesamt erfolgt eine hohe Gewichtung der Kriterien Flächenverbrauch und Schonung der qualitativ besten Böden. Massnahmen zu diesem Ziel umfassen auch eine Flächenoptimierung durch Mehrfachnutzung (zeitlich und multifunktional). Das automatisierte Fahren soll also nicht zu einem substanziellen Ausbau der Infrastrukturen führen.

#### Rahmenbedingungen und Voraussetzungen

Ziel 1: Bei der Anwendung von Innovationen im Bereich der Mobilität nimmt die Schweiz eine internationale Spitzenposition ein.

Ziel 2: Die Zusammenarbeit der verschiedenen Staatsebenen im Verkehrsbereich ist gestärkt.

Ziel 3: Die internationale Einbindung des Schweizer Gesamtverkehrssystems ist optimiert.

Ziel 4: Eine klar definierte Grundversorgung stellt eine zeitlich und räumlich angemessene Erreichbarkeit in allen Regionen des Landes und für alle Bevölkerungsgruppen sicher.

#### Nachfrage, Angebot und Infrastrukturen

Ziel 5: Die Verkehrsnachfrage wird so gelenkt, dass die Leistungsfähigkeit des bestehenden Gesamtverkehrssystems vor der Realisierung von weiteren Aus- oder Neubauten ausgeschöpft wird.

Ziel 6: Das Gesamtverkehrssystem ist sicher, verlässlich, hoch verfügbar und einfach zugänglich.

Ziel 7: Verkehrsteilnehmende in der Schweiz können frei entscheiden, welche Mobilitätsangebote sie nutzen und kombinieren.

#### Finanzierung

Ziel 8: Mit den verfügbaren öffentlichen Mitteln werden das Mobilitätsangebot und die Verkehrsinfrastrukturen kosteneffizient finanziert.

Ziel 9: Die Nutzenden aller Mobilitätsangebote tragen die von ihnen verursachten internen und externen Kosten vermehrt selber.

#### Umwelt, Energie und Raum

Ziel 10: Die Belastung der Umwelt durch Emissionen des Verkehrs ist markant reduziert.

Ziel 11: Die Verkehrsinfrastrukturen werden flächen- und bodenschonend realisiert, sind gut in Landschaft und Siedlungsräume integriert und ihre Trennwirkung ist reduziert.

Ziel 12: Die Energieeffizienz des Verkehrs ist markant erhöht.

Ziel 13: Der Landverkehr funktioniert weitgehend CO<sub>2</sub>-neutral und möglichst ohne fossile Energien.

Ziel 14: Die angestrebte polyzentrische Siedlungsentwicklung wird durch das Gesamtverkehrssystem konsequent gefördert.

**Abb. 35** Handlungsfelder und strategische Ziele des UVEK-Orientierungsrahmens 2040 [6]

Daraus abgeleitete Anforderungen an das automatisierte Fahren für das vorliegende Forschungsvorhaben:

- Die Verkehrssicherheit ist hoch.
- Automatisierte Fahrzeuge werden so genutzt, dass die Kapazitäten der Infrastrukturen erhöht werden.
- Verkehrsinfrastrukturen werden flächenschonend realisiert.

#### **ASTRA-Forschungspaket "Auswirkungen des automatisierten Fahrens"**

Mit dem Forschungspaket zum automatisierten Fahren [13] hat das ASTRA im Rahmen von Teilprojekten vielfältige Aspekte automatisierter und vernetzter Strassenfahrzeuge für den Transport von Personen und Gütern in der Schweiz untersucht. Die Ergebnisse des Forschungspakets schaffen für Politik, Behörden und relevante Stakeholder die Grundlagen, um sich angemessen auf die absehbare Einführung des automatisierten Fahrens in der Schweiz vorzubereiten und diese bei Bedarf auch proaktiv beeinflussen zu können.

Mit dem Forschungspaket konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass die Einführung automatisierter Fahrzeuge unausweichlich ist, lange dauert und zu einer anspruchsvollen Übergangsphase führen wird. Langfristig überwiegen jedoch die Vorteile. Auf Basis der Resultate aus den Teilprojekten wurde ein Zielbild 2050 [18] zum automatisierten Fahren in der Schweiz erstellt. Dieses umfasst unter anderem verschiedene wichtige Bestandteile:

- Es gibt einen selbstlernenden und gemeinsam betriebenen Datenverbund.

- Bei Störungen kommen Rückfallebenen zum Einsatz.
- Der Verkehr wird in den Einführungsphasen verstärkt überwacht.
- Zusätzliche Fahrstreifen infolge von Infrastrukturprogrammen zu neuralgischen Stellen sind automatisierten Fahrzeugen mit hohem Besetzungsgrad vorbehalten.
- Die Verkehrslenkung erfolgt durch neutrale Behörden, diese nehmen eine verkehrsmittelübergreifende Sicht ein.

Schliesslich wurden fünf Handlungsfelder zur Automatisierung des Verkehrs identifiziert, in denen die Aktivitäten der öffentlichen Hand erfolgen sollten. Diese sind:

1. Einführung automatisierter Fahrzeuge ermöglichen
2. Umgang mit Mischverkehr sicherstellen und Phase mit Mischverkehr verkürzen
3. Kollektive Nutzung fördern und ins Gesamtverkehrssystem integrieren
4. Effiziente Nutzung der Verkehrsflächen sicherstellen
5. Neue Angebotsformen zur Stärkung des klassischen öffentlichen Verkehrs nutzen

Daraus abgeleitete Anforderungen an das automatisierte Fahren für das vorliegende Forschungsvorhaben:

- Die Verkehrssicherheit ist hoch.
- Der Datenaustausch und die Vernetzung sind gegenüber heute erhöht.
- Automatisierte Fahrzeuge werden so genutzt, dass die Kapazitäten der Infrastrukturen erhöht werden.

### **Strategische Ausrichtung des ASTRA**

In der "Strategischen Ausrichtung" [7] werden die Vision, die Mission, die Leitsätze und die Ziele des ASTRA festgehalten. Es handelt sich dabei um eine amtpolitische Orientierungshilfe zur Erreichung der langfristigen Ziele. Sie ergänzt die übergeordneten Strategien, bspw. die UVEK-Strategie. In Bezug auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss nennt die Strategische Ausrichtung konkrete Zielwerte zum Horizont 2030.

Ziele 2030 zur Verkehrssicherheit:

- Nicht mehr als 100 Verkehrstote und 2'500 Schwerverletzte pro Jahr auf allen Strassen (2021: 200 Verkehrstote und 3'933 Schwerverletzte im Strassenverkehr).
- Die Betriebssicherheit der Fahrzeuge ist sichergestellt.
- Die Bevölkerung nimmt die Strasse als attraktiv und sicher wahr.

Ziele 2030 zum Verkehrsfluss:

- Die Anzahl jährlicher Staustunden auf der Nationalstrasse hat sich gegenüber 2015 um ein Viertel reduziert (2021: +25%).
- Die Intelligenz der Nationalstrasse (Streckenausrüstung) entspricht dem Notwendigen.
- Die durchschnittliche Auslastung der Fahrzeuge liegt bei über zwei Personen.
- Die täglichen Verkehrsspitzen im Mittelland und in den Agglomerationen sind abgeflacht.

Darüber hinaus werden weitere Ziele in Bezug auf das automatisierte Fahren und mit Horizont 2030 formuliert:

- Vollautomatisierte und vernetzte Fahrzeuge verkehren auf der Nationalstrasse.
- Grenzüberschreitender, vollautomatisierter Verkehr ist möglich.
- Der Zugang steuerbarer Fahrzeuge zu allen Strassen ist gewährleistet.
- Die Potenziale der intelligenten Mobilität sind konsequent genutzt.

Daraus abgeleitete Anforderungen an das automatisierte Fahren für das vorliegende Forschungsvorhaben:

- Objektive Verkehrssicherheit: Heutige Unfallzahlen sinken.  
*Grössenordnung bis 2030: Abnahme um ca. 50% (Verkehrstote) bzw. ca. 40% (Schwerverletzte)*
- Die subjektive Verkehrssicherheit ist angemessen.
- Verkehrsfluss: Die Stauzustände nehmen gegenüber heute ab.  
*Grössenordnung bis 2030: Abnahme um ca. 25%*
- Automatisierte Fahrzeuge werden so genutzt, dass die Kapazitäten der Infrastrukturen erhöht werden.

### Teilstrategie Verkehrssicherheit

Mit Teilstrategien konkretisiert das ASTRA seine Amtsstrategie. Sie bilden gleichzeitig einen Bestandteil davon und verknüpfen die verschiedenen Disziplinen. In den Teilstrategien werden für den Horizont 2030 verschiedenen Handlungsfelder und Massnahmen aufgeführt. Die Teilstrategie Verkehrssicherheit [9] tut dies für verschiedene sicherheitsrelevante Aspekte des Strassenverkehrs. Die wichtigsten Punkte für die vorliegende Forschungsarbeit sind:

- Handlungsfeld "Mensch": Assistenzsysteme sollten im Grundsatz selbsterklärend sein.
- Handlungsfeld "Fahrzeug": Automatisierte Fahrzeuge bedeuten neben potenziellen Sicherheitsgewinnen auch neue Gefahren für den Strassenverkehr. Die Unfallanalyse soll in Bezug auf die Verfügbarkeit zusätzlicher Daten weiterentwickelt werden.
- Handlungsfeld "Infrastruktur": Konsolidierung und Erweiterung der normierten Infrastruktur-Sicherheitsinstrumente (ISSI).
- Handlungsfeld "Finanzen": Finanzielle Anreize sind denkbar, um ein verkehrssicheres Verhalten zu erreichen. Die Kompetenz liegt nicht beim ASTRA.
- Handlungsfeld "Daten": verschiedene Datenquellen erschliessen
- Handlungsfeld "Organisation und Forschung": Koordination beim Enforcement (hohe Wirkung ohne zu grosse Repression)

Daraus abgeleitete Anforderungen an das automatisierte Fahren für das vorliegende Forschungsvorhaben:

- Objektive Verkehrssicherheit: Heutige Unfallzahlen sinken.
- Die subjektive Verkehrssicherheit ist angemessen.
- Der Datenaustausch und die Vernetzung sind gegenüber heute erhöht.

### Teilstrategie Verkehrsfluss

Mit Teilstrategien konkretisiert das ASTRA seine Amtsstrategie. Die Teilstrategie Verkehrsfluss [8] tut dies für verschiedene verkehrstechnische Aspekte des Strassenverkehrs. Die wichtigsten Punkte für die vorliegende Forschungsarbeit sind:

- Handlungsfeld "Effizientere Nutzung vorhandener Nationalstrassen-Kapazitäten": Mit weiteren technischen und betrieblichen Massnahmen wird der Verkehrsfluss auf den bestehenden Nationalstrassen länger aufrechterhalten. Zusätzliche Verkehrsmanagement-Anlagen (VM-Anlagen) wie Systeme zur Geschwindigkeitsharmonisierung und Gefahrenwarnung (GHGW) oder Rampendosierungen sollen beschleunigt umgesetzt werden. Weitere VM-Massnahmen (Linksfahrgebot für Lastwagen, temporäre Geschwindigkeitslimits, Sperrungen von Ein-/Ausfahrten etc.) sollen geprüft werden. Zur Erhöhung der Fahrzeugauslastung sollen die Förderung des Carpoolings und eine Vertiefung zum Mobility Pricing verfolgt werden.
- Handlungsfeld "Stärkung netzübergreifendes VM an den Schnittstellen": Ein netzübergreifendes VM soll mit Kantonen und Städten etabliert werden. Mit einem Anschluss-Screening soll eine verbesserte Problemanalyse ermöglicht werden.
- Handlungsfeld "Grundlagenwissen erweitern": Über Forschung und Pilotprojekte soll das Wissen bzgl. Verkehrsfluss erweitert werden.

Daraus abgeleitete Anforderungen an das automatisierte Fahren für das vorliegende Forschungsvorhaben:

- Verkehrsfluss: Die Stauzustände nehmen gegenüber heute ab.
- Automatisierte Fahrzeuge werden so genutzt, dass die Kapazitäten der Infrastrukturen erhöht werden.

### **Teilstrategie Intelligente Mobilität**

Mit Teilstrategien konkretisiert das ASTRA seine Amtsstrategie. Die Teilstrategie Intelligente Mobilität [10] tut dies für verschiedene Aspekte von neuen Mobilitäts-, Steuerungs- und Vernetzungsformen. Die wichtigsten Punkte für die vorliegende Forschungsarbeit sind:

- Handlungsfeld "Einbettung neuer Mobilitätsformen und Dienste im digitalen Mobilitätssystem": Teil-, hoch- oder vollautomatisierte Fahrzeuge sollen in den Verkehr gebracht und genutzt werden. Hierzu soll eine Teilrevision des SVG erfolgen und die schweizerischen Anforderungen sind bei UNECE und der EU einzubringen. Es sind Massnahmen gegen die Manipulation automatisierter Fahrzeuge und Mobilitätsdienste festzulegen. Zudem soll eine Verkehrsdatenplattform (Pilotanwendung) mit Verkehrszählerdaten initiiert und betrieben werden.
- Handlungsfeld "Ertüchtigung der Infrastruktur": Es sollen Pilotversuche zu V2V und V2I mit industriellen Partnern durchgeführt werden. Die (technische) Ausstattung von Strassen ist anhand von Anwendungsfällen zu prüfen, der Systemaufbau und die Kosten sind zu klären. Es ist ein Konzept zur elektronischen Verschlüsselung von Meldungen V2V, V2I zu erarbeiten. Zudem soll ein digitales Verkehrsnetz / Netzgraphen (Swisstopo) erstellt werden.
- Handlungsfeld "Nutzung der Daten aller Verkehrsteilnehmenden, Verkehrsmittel und -träger": Es soll eine Auslegeordnung zum Datenaustausch inkl. rechtlicher Rahmenbedingungen erarbeitet werden. Zudem soll eine Rollenklärung des ASTRA in Bezug auf die intelligente Mobilität stattfinden.

Daraus abgeleitete Anforderungen an das automatisierte Fahren für das vorliegende Forschungsvorhaben:

- Der Datenaustausch und die Vernetzung sind gegenüber heute erhöht.
- Die Streckenausrüstung ist minimiert in Bezug auf die Gesamtkosten.

### **Sachplan Verkehr, Teil Infrastruktur Strasse**

Sachpläne sind Instrumente zur Koordination der raumwirksamen Tätigkeiten des Bundes. Sie sind im Raumplanungsgesetz (RPG) verankert und sind behördenverbindlich. Der Sachplan Verkehr stellt die Koordination sowohl des gesamten Verkehrssystems als auch des Verkehrssystems mit der Raumentwicklung sicher [11]. Im Konzeptteil werden die Grundsätze der Infrastrukturplanung der Nationalstrassen beschrieben. Für die vorliegende Forschungsarbeit sind insbesondere die Ziele der Verkehrsinfrastrukturpolitik mit Bezug zur Nationalstrasse relevant, vgl. Abb. 36.

- Die Funktionalität der Nationalstrasse ist für den Personen- und den Güterverkehr zu erhalten, der Betrieb und der Unterhalt sind auf den Wert- und den Substanzerhalt auszulegen.
- Durch die Sicherstellung der Nationalstrassen-Verbindungen zwischen den metropolitenen und grossstädtischen Einzugsgebieten auf einem hohen Qualitätsniveau werden die Standortattraktivität und die angestrebte Raumentwicklung der Schweiz unterstützt.
- Die Nationalstrassen erbringen eine Grunderschliessung für den motorisierten Individualverkehr. Soweit die verkehrliche und betriebliche Zweckmässigkeit gegeben ist und die Ziele der Raumentwicklung unterstützt werden, kann die Nationalstrasse auch bei der Aufrechterhaltung der Erreichbarkeit von ländlichen Räumen und der Tourismusregionen Aufgaben übernehmen.
- Die Weiterentwicklung der Nationalstrasse unterstützt die Siedlungsentwicklung nach innen, die Steigerung der Qualität des Siedlungsraumes und sie erfolgt in Koordination mit den Ausbauabsichten der Schieneninfrastruktur.
- Die Nationalstrassen sind für die Verkehrsteilnehmer sicher befahrbar, sowohl bezogen auf Unfall- als auch auf Naturgefahren und ihre Auswirkungen.
- Die Belastungen der Umwelt und der natürlichen Lebensgrundlagen durch Bau und Betrieb der Nationalstrassen sind zu minimieren.
- Betrieb und Unterhalt der Nationalstrasse werden kosteneffizient sichergestellt; der Ausbau erfolgt abgestimmt auf die verfügbaren finanziellen Mittel.

**Abb. 36** Ziele der Verkehrsinfrastrukturpolitik des Bundes für den Aufgabenbereich der Nationalstrasse gemäss Sachplan Verkehr, Teil Infrastruktur Strasse [11]

Die Ziele des Sachplans haben auch Bestand bei der Einführung des automatisierten Fahrens. Wichtige Aspekte sind:

- Die Potenziale aus den absehbaren technologischen Entwicklungen sollen gewinnbringend genutzt werden. Das automatisierte Fahren sollte so realisiert werden, dass seine potenziellen Beiträge zum Erhalt der Funktionalität ausgeschöpft werden.
- Neue oder bestehende Zerschneidungseffekte der Nationalstrasse sind zu reduzieren, Fruchtfolgefleichen sind zu schonen. Die Nationalstrassenanlage ist räumlich mit anderen Infrastrukturanlagen zu bündeln.
- Das automatisierte Fahren soll so umgesetzt werden, dass die Sicherheit für die Verkehrsteilnehmenden hoch ist.

Daraus abgeleitete Anforderungen an das automatisierte Fahren für das vorliegende Forschungsvorhaben:

- Die Verkehrssicherheit ist hoch.
- Automatisierte Fahrzeuge werden so genutzt, dass die Kapazitäten der Infrastrukturen erhöht werden.
- Verkehrsinfrastrukturen werden flächenschonend realisiert.

## 5.2 Übersicht abgeleitete Anforderungen

Aus den in Kapitel 5.1 beschriebenen Grundlagen gehen vielfältige Anforderungen an das Verkehrssystem hervor, die teilweise unabhängig vom automatisierten Fahren sind. Da das automatisierte Fahren aber kein Selbstzweck ist, sollten die Anforderungen des Bundes möglichst gut abgedeckt werden. In Bezug auf die vorliegende Fragestellung können folgende Anforderungen bzw. Kriterien abgeleitet werden, anhand derer die Konzepte zu den Übergängen des automatisierten Fahrens beurteilt werden sollen:

1. Objektive Verkehrssicherheit: Heutige Unfallzahlen sinken.  
*Grössenordnung bis 2030: Abnahme um ca. 50% (Verkehrstote) bzw. ca. 40% (Schwerverletzte)*
2. Die subjektive Verkehrssicherheit ist angemessen.
3. Verkehrsfluss: Die Stauzustände nehmen gegenüber heute ab.  
*Grössenordnung bis 2030: Abnahme um ca. 25%*
4. Automatisierte Fahrzeuge werden so genutzt, dass die Kapazitäten der Infrastrukturen erhöht werden.

5. Der Datenaustausch und die Vernetzung sind gegenüber heute erhöht.
6. Die Streckenausrüstung ist minimiert in Bezug auf die Gesamtkosten.
7. Verkehrsinfrastrukturen werden flächenschonend realisiert.

Eine Gewichtung bzw. Priorisierung der aufgeführten Kriterien kann aus den vorhandenen Grundlagen nicht abgeleitet werden. Dementsprechend sind alle Anforderungen möglichst gut abzudecken.

## 6 Ableitung von Konzepten anhand der Betrachtung von Beispielabschnitten

Im folgenden Kapitel wird anhand von Beispielabschnitten verdeutlicht, wie die Implementierung des automatisierten Fahrens in Bezug auf die fünf Übergangstypen erfolgen kann. Hierzu wird für jeden Übergangstyp ein Beispielabschnitt herangezogen, um eine exemplarische Ausgangssituation im Detail zu untersuchen und anhand von Verkehrsdaten zu analysieren. Die Auswahl der Beispielabschnitte basiert auf den Erkenntnissen aus Kapitel 4. Es wurden jeweils Abschnitte ausgewählt, in denen entsprechende Übergänge potenziell häufig auftreten. Die einzelnen Beispielabschnitte je Übergangstyp sind in Tab. 1 aufgeführt.

**Tab. 1** Ausgewählte Beispielabschnitte für die fünf Übergangstypen

Übergangstyp	Beispielabschnitt
1. Einfahren in die HLS	N1, Anschluss Dietikon (Einfahrt)
2. Verlassen der HLS	N1, Anschluss Dietikon (Ausfahrt)
3. Aktivierung der Fahrstreifensteuerung	N2, Abschnitt Melide/Bissone – Mendrisio (Abschnitt zur Engpassbeseitigung)
4. Wechsel des Verkehrszustands auf Kapazitätsbereich/Stau	N14, Abschnitt Buchrain – Rotsee (Abschnitt mit hoher Stauwahrscheinlichkeit in Spitzenzeiten)
5. Witterungswechsel auf "schlecht"	N9, Abschnitt Sion-Est – Sierre-Ouest (Alpenraum)

Ziel der Betrachtung von Beispielabschnitten ist es, für die fünf Übergangstypen eine Analyse und Beschreibung der heutigen Ausgangslage betreffend Verkehrsfluss und Verkehrssicherheit exemplarisch durchzuführen. Auf dieser Grundlage erfolgen anschliessend Rückschlüsse auf zukünftige Übergangssituationen zwischen Mischverkehr und vollständig automatisiertem Verkehr bzw. Mischverkehr und konventionell gesteuerten Fahrzeugen.

### 6.1 Vorgehensweise

Für die Analyse der Beispielabschnitte wurden folgende Einzelindikatoren definiert:

- Verkehrsnachfrage
- Verkehrszustand
- Konstanz der Geschwindigkeit
- Gefahrene Geschwindigkeit
- Fahrzeugabstände zwischen Fahrzeugen (Folgezeitlücken)
- Objektive Verkehrssicherheit (registrierte Unfälle)
- Subjektive Verkehrssicherheit

Als Datengrundlage für die Auswertung der Indikatoren wurden Einzelfahrzeugdaten der ASTRA-Strassenverkehrszählung (SVZ) als Rohdaten extrahiert und aufbereitet. Diese geben pro erhobenes Fahrzeug unter anderem die Uhrzeit, die Fahrzeugklasse und die Geschwindigkeit an. Es werden Fahrzeuge des Personen- und des Güterverkehrs auf der Strasse betrachtet. Die Auswertungen der Indikatoren beschränken sich auf Strassenabschnitte innerhalb des Nationalstrassennetzes. Detektorzählungen an Ein- und Ausfahrtsrampen des Nationalstrassennetzes konnten teilweise nicht vollständig berücksichtigt werden, da sie in andere IT-Systeme eingebunden sind.

Um eine hohe Repräsentativität der Ergebnisse sicherzustellen, wurde das Jahr 2019 als Bezugsjahr ausgewählt. So können allfällige Schwankungen der Ergebnisse aufgrund der Pandemiejahre ausgeschlossen werden.

Die Auswertungen der Indikatoren stützten sich auf die Methodik des ASTRA-Projekts "Angebotsziele Nationalstrassen" [20]. Im Rahmen dieses Projekts wird eine jährliche Beurteilung der Angebotsqualität auf Abschnitten des Nationalstrassennetzes durchgeführt. Dabei werden verschiedene Indikatoren, basierend auf der Strassenverkehrszählung des ASTRA, jährlich analysiert und bewertet. Im Folgenden wird pro Indikator die Auswertungsmethodik kurz erläutert.

### Verkehrsnachfrage

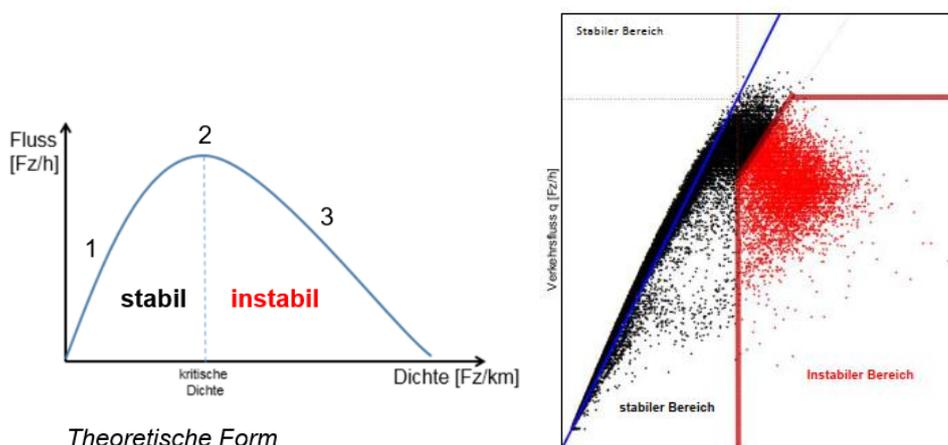
Für die Ermittlung der Verkehrsnachfrage wurden für jeden Beispielabschnitt sowohl der durchschnittliche Tagesverkehr [Fz/d] als auch die Abendspitze [Fz/h] von 17:00 – 18:00 Uhr anhand der Einzelfahrzeugdaten berechnet. Die Auswertung erfolgte differenziert für die Fahrzeugkategorien Personenwagen (PW), Lieferwagen (LI), Motorräder (MR) sowie den Schwerverkehr (SV).

Um eine detailliertere Betrachtung der Verkehrsnachfrage zu erhalten, wurden zusätzlich auch Tagesganglinien für die einzelnen Beispielabschnitte berechnet. Hierfür wurde die Anzahl erfasster Personenwagen pro Wochentag und Fahrtrichtung für alle 15-Minuten-Intervalle eines Jahres ausgewertet und grafisch aufbereitet.

### Verkehrszustand

In Bezug auf den Verkehrszustand gilt es, instabile Zustände von stabilen Zuständen zu unterscheiden. Ein Verkehrszustand kann über den Verkehrsfluss [Fz/h] und die Fahrzeugdichte [Fz/km] abgegrenzt werden. Instabile Verkehrszustände zeichnen sich durch hohe Fahrzeugdichten [Fz/km] und reduzierte Verkehrsflüsse [Fz/h] aus. Grundlage für die Analyse der einzelnen Verkehrszustände je Abschnitt ist die Methodik des Projekts "Angebotsziele Nationalstrassen". Die Einzelfahrzeugdaten wurden so aufbereitet, dass je Strassenabschnitt der Verkehrszustand pro Fahrtrichtung für alle 5-Minuten-Intervalle eines Jahres berechnet wurde.

Auf Basis eines auf den betrachteten Abschnitt erstellten Fundamentaldiagramms wird daraufhin beurteilt, ob ein stabiler oder instabiler Zustand auftritt. Ein Fundamentaldiagramm beschreibt den Verkehrszustand und zeigt den Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss [Fz/h] und Verkehrsdichte [Fz/km] auf (siehe Abb. 37).



**Abb. 37** Theoretische Abbildung eines Fundamentaldiagramms und empirische Resultate, [20]

Die Teilbereiche eines Fundamentaldiagramms lassen sich wie folgt beschreiben:

- Bereich 1: Verkehrsfluss nimmt mit steigender Verkehrsdichte zu, bis die kritische Dichte erreicht wird (=freier Fluss).
- Bereich 2: Maximaler Verkehrsfluss entspricht der Strassenkapazität.

- Bereich 3: Verkehrsfluss sinkt mit steigender Verkehrsdichte (=Stau).

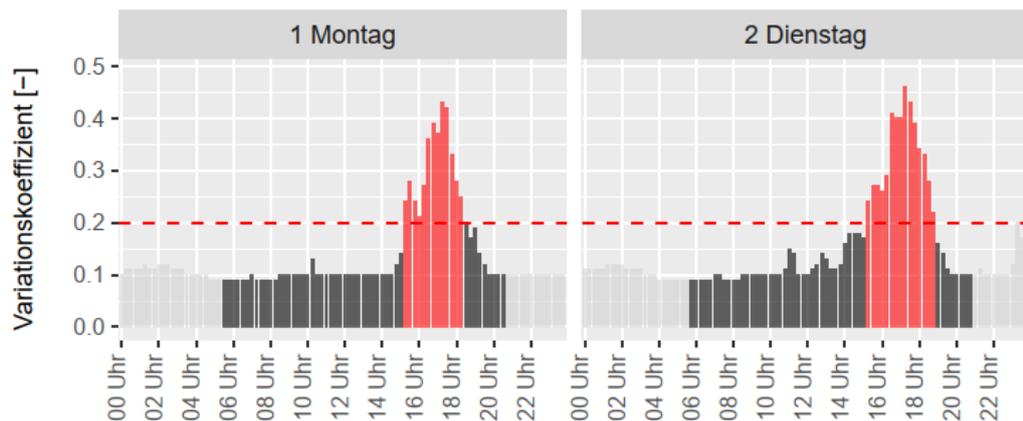
Für die Abgrenzung der instabilen Verkehrszustände wurde im Rahmen des Projekts "Angebotsziele Nationalstrassen" eine Approximation auf Basis der empirischen Daten entwickelt, die eine situationsspezifische Abgrenzung eines instabilen Bereichs ermöglicht. Je nach definiertem Bereich wechselt der Verkehrszustand bei kritischer Verkehrsdichte somit von stabil (schwarz) zu instabil (rot).

### Konstanz der Geschwindigkeit

Die Konstanz der Geschwindigkeit zeigt die Prognostizierbarkeit einer Reise im Sinne von möglichst wenig Streuung der Fahrgeschwindigkeit und damit möglichst wenig Streuung der Reisezeit auf.

Für die Auswertung dieses Indikators wurde ebenfalls die Methodik des ASTRA-Projekts angewendet. Dazu wurde die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeit im 15 Minuten-Intervall eines Wochengangs über das gesamte Jahr hinweg berechnet. Die entwickelte Methode ermöglicht eine Beurteilung pro Wochentag (unter Ausschluss von Feiertagen) und pro 15-Minutenintervall, ob der Variationskoeffizient der PW-Geschwindigkeit unterhalb einer definierten Zielstreuung von 0.2 liegt (siehe Abb. 38). Der Variationskoeffizient berechnet sich aus der Standardabweichung und dem Mittelwert aller Geschwindigkeiten von Fahrzeugen. Eine Zielstreuung von 0.2 wurde unter der Annahme festgelegt, dass PW-Geschwindigkeiten einer Normalverteilung folgen und der Mittelwert auf Autobahnen bei 80 km/h liegt. Ein Variationskoeffizient von 0.2 bedeutet, dass 80% der PW-Geschwindigkeiten eine maximale Abweichung von 20 km/h vom Mittelwert (sprich 80 km/h) aufweisen.

Die Balken in der Abbildung sind bei denjenigen Intervallen rot eingefärbt, bei denen die Zielstreuung überschritten wird. In diesen Intervallen weicht die gefahrene Geschwindigkeit deutlich vom Mittelwert ab. Dies kann beispielsweise bei einem häufigen instabilen Verkehrszustand in Spitzenzeiten auftreten. Wenn die Zielstreuung nicht überschritten wird und die gefahrene Geschwindigkeit dem Mittelwert entspricht, sind die Intervalle schwarz eingefärbt.



**Abb. 38** Streuung der gefahrenen Geschwindigkeit über das gesamte Jahr pro 15 Minutenintervall am Montag und Dienstag. Rot gestrichelt: Zielstreuung von 0.2, Rote Balken: Zielstreuung wird überschritten

### Gefahrene Geschwindigkeit

Die gefahrene Geschwindigkeit wird bei den Strassenverkehrszählstellen des ASTRA in Fahrzeugauflösung erfasst. Für die Auswertung wurde die mittlere gefahrene Geschwindigkeit pro 5-Minuten-Intervall berechnet. Bei der Festlegung des Schwellenwerts für die Überschreitung der zugelassenen Geschwindigkeit wurden Messtoleranzen berücksichtigt und dabei folgende Annahmen getroffen:

- Auf Nationalstrassen: über 125 km/h

- Auf Rampen (Aus- und Einfahrt): über 80 km/h

### **Folgezeitlücken (Mindestabstand von Fahrzeugen)**

Folgezeitlücken beschreiben die zeitlichen Abstände zwischen Fahrzeugen, und zwar von Heckstossstange des vorangehenden Fahrzeugs bis zur Frontstossstange des Folgefahrzeugs. Eine zu geringe Folgezeitlücke kann dazu führen, dass Fahrer/-innen auf ein Fahrmanöver des vorangehenden Fahrzeugs nicht mehr rechtzeitig reagieren können. Eine zu geringe Folgezeitlücke ist dementsprechend sicherheitskritisch. Als Faustregel gilt, dass der zeitliche Mindestabstand zwischen zwei Fahrzeugen mindestens halb so viele Meter wie die Geschwindigkeit in Kilometern pro Stunde betragen soll ("Halber Tacho"). Dies bedeutet z.B., dass bei einer gefahrenen Geschwindigkeit von 80 km/h der Abstand mindestens 40 m betragen sollte. Die Faustregel des "halben Tachos" entspricht somit einem Abstand von 1.8 Sekunden. In der Rechtsprechung in der Schweiz wird diese Faustregel regelmässig angewandt, um eine einfache Verkehrsregelverletzung festzustellen [71]. Eine grobe Verkehrsregelverletzung liegt gemäss Rechtspraxis in der Schweiz bei einer Unterschreitung einer Mindestfolgezeitlücke von 0.6s vor. In Deutschland werden Fahrerinnen und Fahrer bei einer erfassten Unterschreitung von unter 1.1s gebüsst.

Zur Untersuchung der Folgezeitlücken werden die erhobenen Werte der Strassenverkehrszählstellen des ASTRA verwendet. Dabei wird die Folgezeitlücke direkt gemessen. Für die vorliegende Forschungsarbeit wird ausgewertet, wie hoch der Anteil der Fahrzeuge mit einer Unterschreitung einer Folgezeitlücke von 1.8s ist ("Halber Tacho"). Für eine Sensitivitätsbetrachtung erfolgt ausserdem auch eine Betrachtung mit einer Folgezeitlücke von 0.9s.

Für automatisierte Fahrzeuge wird von einer deutlich kürzeren Reaktionszeit ausgegangen. Sind die Fahrzeuge zusätzlich vernetzt, kann das nachfolgende Fahrzeug sehr schnell auf alle vernetzten, vorausfahrenden Fahrzeuge reagieren. Somit reicht eine Folgezeitlücke von 0.9s (vgl. Abschnitt 2.6).

### **Objektive Verkehrssicherheit**

Als Mass der objektiven Verkehrssicherheit dienen die im jeweiligen Perimeter polizeilich registrierten Unfälle in den Jahren 2012 bis 2021. Alle Unfälle werden unabhängig von der Unfallschwere, also unabhängig von den Folgen des jeweiligen Unfalls, als Grundlage für die Beschreibung des Ist-Zustands der objektiven Verkehrssicherheit verwendet.

Die Unfälle werden einerseits nach Unfalltyp und andererseits nach Unfallursache analysiert. Massgebend bei den Unfalltypen sind die häufigsten Unfalltyp-Gruppen wie z.B. „Schleuder- oder Selbstunfall“, „Auffahrkollision“ oder „Überholunfall, Fahrstreifenwechsel“. Bei den Unfallursachen wird das Merkmal „Hauptursache Untergruppe“ verwendet. Die Ursachen sind folglich z.B. der „Zustand der Person“, „Vortritt“ oder „Unaufmerksamkeit und Ablenkung“. Zudem werden die registrierten Unfälle räumlich auf dem betrachteten Strassenabschnitt verortet, um allfällige Muster qualitativ zu identifizieren.

### **Subjektive Verkehrssicherheit**

Die subjektive Sicherheit beschreibt das Kollektiv der von individuellen Verkehrsteilnehmenden subjektiv wahrgenommenen Sicherheitsgefühlen. Dieses wird unter anderem von Faktoren wie der gefahrenen Geschwindigkeiten oder den Folgezeitlücken beeinflusst, kann aber nicht quantitativ auf Basis objektiver Indikatoren bewertet werden. Das Sicherheitsgefühl hängt vielmehr von der Kenntnis des Risikos, von der erwarteten Folgeschwere und von der Kontrollierbarkeit, also der subjektiven Einschätzung, ob die negativen Folgen durch eigenes Handeln vermeidbar sind (Hackenfort, 2012 [70]). Die Beurteilung der Risikokenntnis, der Erwartung bezüglich Folgeschwere und der Kontrollierbarkeit liegen keine Ist-Werte vor. Für die Analyse des Ist-Zustands und der Veränderung durch das automatisierte Fahren werden die genannten,

messbaren Faktoren und die Änderung dieser Faktoren qualitativ beurteilt. Dabei wirken die Faktoren insbesondere auf die Kontrollierbarkeit und in kleinerem Ausmass auf die erwartete Folgeschwere (z.B. die gefahrene Geschwindigkeit). Das Ziel ist eine möglichst angemessene subjektive Sicherheit zu erreichen, weder zu tief noch zu hoch.

### Erarbeitung von Konzepten

Ausgehend von der analysierten heutigen Situation werden für die betrachteten Übergangstypen Konzepte entwickelt, wie diese gestaltet (Infrastruktur, Ausstattung) und betrieben (Steuerung, auch über Vernetzung) werden können. Hierfür wurde jeweils ein Entwurf durch das Projektteam erarbeitet, der mit der Begleitkommission des Forschungsprojektes kritisch diskutiert (insbesondere hinsichtlich Folgen auf den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit) und anschliessend überarbeitet wurde. In den folgenden Kapiteln wird das Resultat aufgeführt und kurz beschrieben. Aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten, aber auch aufgrund des bisher für die Schweiz nicht getroffenen Entscheids werden zwei verschiedene Fälle bzgl. Datenaustausch betrachtet. Auf der einen Seite ist dies ein starker (öffentlicher) Datenverbund, also eine Vernetzung, die durch den Staat organisiert wird und die öffentlichen Interessen bzw. die Sicht von Strasseneigentümer und -betreiber weitgehend abbildet. Dabei wird eine Vernetzung V2I weitgehend umgesetzt. Auf der anderen Seite ist dies ein Datenverbund auf Ebene Fahrzeuge/Hersteller, also eine Vernetzung, die durch die Fahrzeughersteller/-betreiber organisiert wird. Dieser Fall kommt ohne eine Vernetzung V2I aus.

### Bewertung der Konzepte

Die entwickelten Konzepte werden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die objektive und subjektive Verkehrssicherheit und auf den Verkehrsfluss beurteilt. Dies erfolgt immer in Bezug auf die analysierte, heutige Situation auf den entsprechenden Abschnitten der Nationalstrasse. Die Beurteilung geht auf die Expertinnen und Experten aus dem Projektteam zurück und wurde durch Begleitkommission des Forschungsprojektes kritisch diskutiert. Es kommt eine Skala gemäss Tab. 2 zum Einsatz.

**Tab. 2** Skala zur Beurteilung der Wirkungen

Stufe	Bedeutung
++	Ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung erwartet
+	Ggü. heutiger Situation womöglich verbessert
0	Ggü. heutiger Situation keine oder gegenläufige Effekte
-	Ggü. heutiger Situation womöglich verschlechtert
--	Ggü. heutiger Situation deutliche Verschlechterung erwartet

## 6.2 Übergangstyp 1: Einfahren in die HLS

Der Übergangstyp 1 betrachtet das Einfahren in die HLS, sprich die Einfahrt auf die Autobahn über die Einfahrtsrampe. Eine Implementierung des automatisierten Fahrens bei diesem Übergang würde bedeuten, dass Fahrzeuge bereits auf der Einfahrtsrampe in den automatisierten Modus wechseln. Das Fahrmanöver des Einfahrens in die HLS wird somit nicht mehr von dem/der Fahrer/-in ausgeführt.

### 6.2.1 Ausgangslage

Als Beispielabschnitt für den Übergangstyp 1 wurde der Anschluss Dietikon auf der N1 ausgewählt (siehe Abb. 39). Um das „Einfahren auf die Autobahn“ zu analysieren, wurden Detektorzählungen sowohl auf der Einfahrtsrampe (orange gekennzeichnet) als auch auf

der gleichgerichtet verlaufenden Autobahnstrecke in Richtung Bern (blau gekennzeichnet) betrachtet.

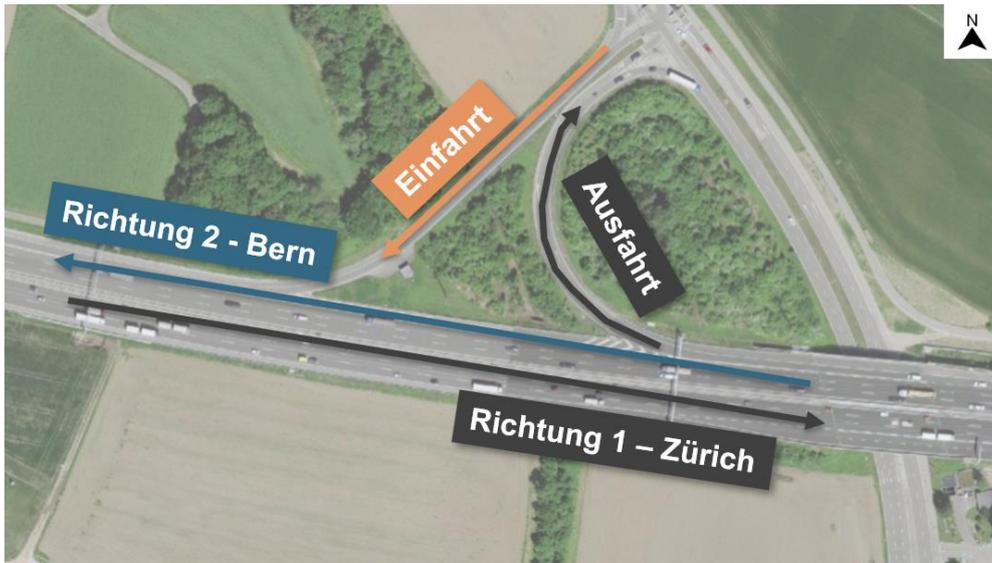


Abb. 39 Beispiel Übergangstyp 1: Anschluss Dietikon, eigene Darstellung

### Verkehrsnachfrage

Beim Anschluss Dietikon fahren rund 5'800 Personen- und Lieferfahrzeuge pro Tag über die Einfahrtsrampe auf die N1 Fahrtrichtung Bern (siehe Abb. 40). Dies entspricht rund 11% des Verkehrsaufkommens an Personen- und Lieferwagen in Fahrtrichtung Bern, das nach der Einfahrt gemessen werden kann. In der Spitzenstunde fahren über alle Fahrzeugkategorien hinweg rund 360 Fahrzeuge auf die N1. Der Anschluss Dietikon kann somit als hochbelasteter Anschluss bezeichnet werden.

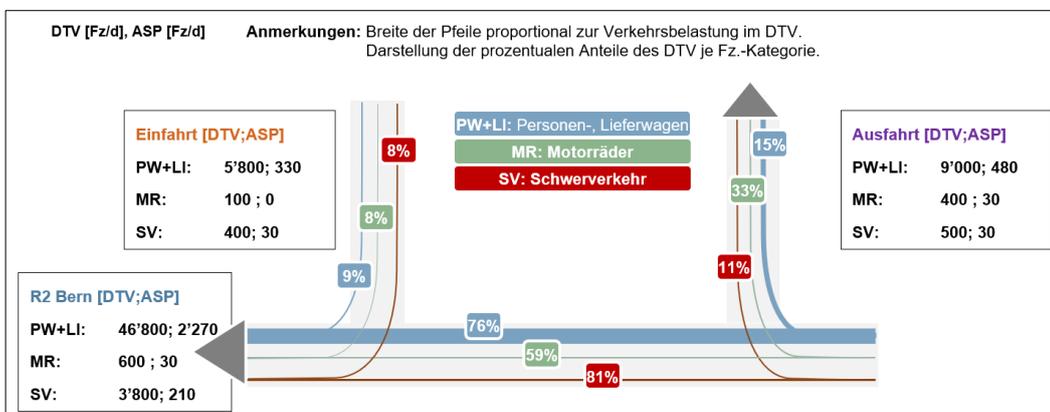
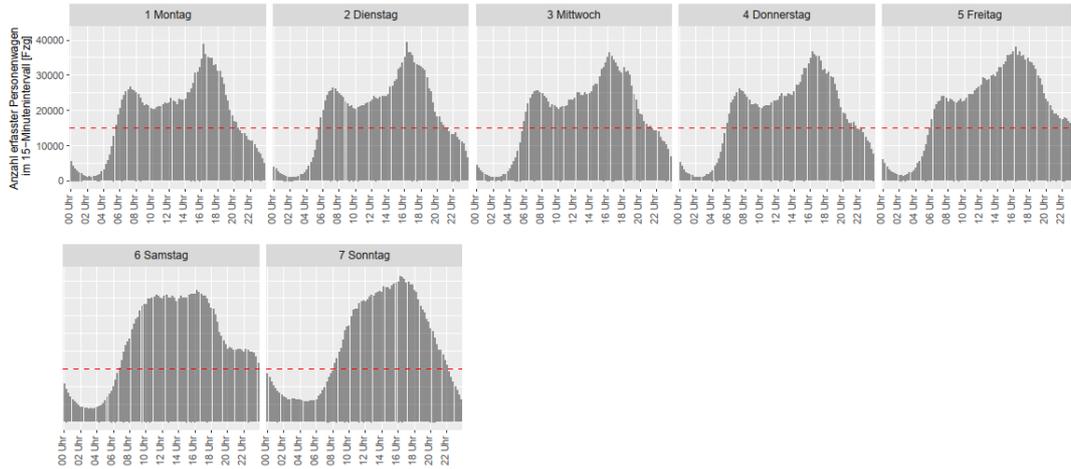


Abb. 40 Beispiel Übergangstyp 1 - Verkehrsbelastung DTV [Fz/d], ASP [Fz/h] für Ein- und Ausfahrt sowie Fahrtrichtung Bern, eigene Darstellung

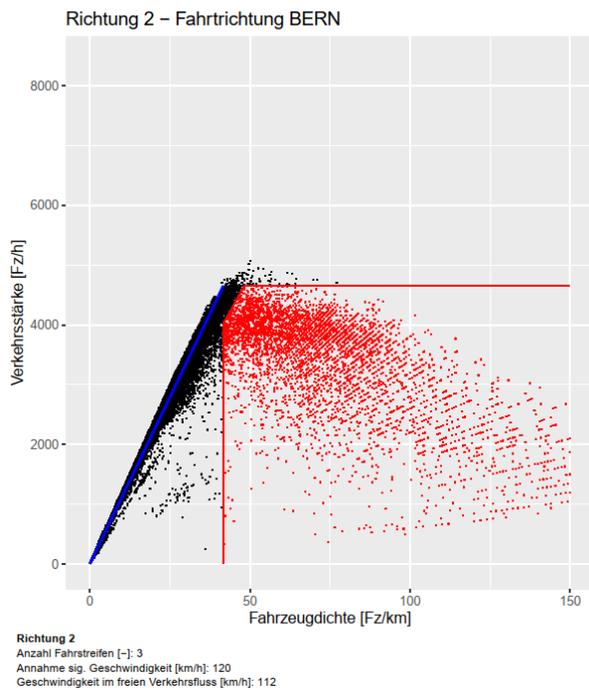
Bei Betrachtung der Tagesganglinien auf Basis der PW-Fahrzeuge pro Tag im 15-Minuten-Intervall in Fahrtrichtung Bern wird deutlich, dass die werktägliche Abendspitze ausgeprägter ist als die Morgenspitze. Die höchsten Verkehrsbelastungen zeichnen sich im Wochenschnitt vor allem am Wochenende (Samstag und Sonntag) ab. Diese sind auf einen hohen Anteil an Einkaufs- und Freizeitverkehr am Wochenende zurückzuführen.



**Abb. 41** Beispiel Übergangstyp 1 – Tagesganglinien im DTV [Fz/d], eigene Darstellung

**Verkehrszustand**

Von insgesamt 104'944 bewerteten Zeitintervallen auf der Stammstrecke der N1 in Fahrtrichtung Bern können 4.5% dem instabilen Zustand zugeordnet werden (vgl. Abb. 42). Für die Einfahrt wurden keine separaten Auswertungen durchgeführt.



**Abb. 42** Beispiel Übergangstyp 1 – Fundamentaldiagramm zum Verkehrszustand für Fahrtrichtung Bern, eigene Darstellung

**Konstanz der Geschwindigkeit**

Insbesondere während der werktäglichen Abendspitze kommt es auf dem betrachteten Abschnitt in Richtung Bern (Stammstrecke) häufig zu instabilen Zuständen, da hohe Abweichungen der mittleren Geschwindigkeiten auftreten (siehe Abb. 43). Am Wochenende sind trotz hoher Verkehrsbelastungen keine Überschreitungen der Zielstreuung identifizierbar. Für die Einfahrt wurden keine separaten Auswertungen durchgeführt.

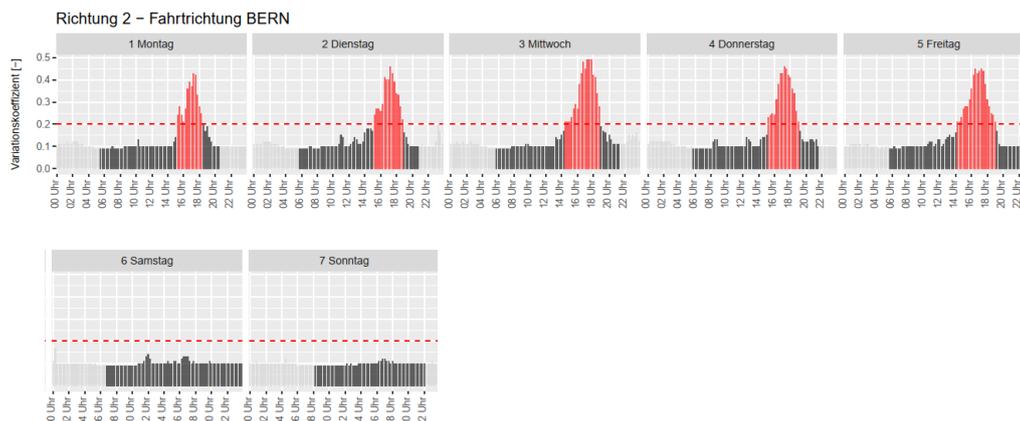


Abb. 43 Beispiel Übergangstyp 1 – Konstanz der Geschwindigkeit

### Folgezeitlücken

Die sicherheitsbedingten minimalen Folgezeitlücken werden bei konventionellen Fahrzeugen auf allen Fahrstreifen in Richtung Bern unterschritten. Die Unterschreitungen variieren je nach Fahrstreifen und Fahrzeugkategorie zwischen 13 – 55% (bei Betrachtung <1.8 Sekunden). Dabei sind insbesondere auf dem Normalstreifen und dem 2. Überholstreifen bedeutende Unterschreitungen festzustellen. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass auch eine Zeitlücke von 0.9 Sekunden häufig unterschritten wird, nämlich zwischen 2 – 27% (je nach Fahrstreifen). Auf der Einfahrt unterschreiten 9% der Personen- und Lieferwagen und 18% der Motorräder die minimale Folgezeitlücke von 1.8 Sekunden.

Tab. 3 Beispiel Übergangstyp 1 – Unterschreitung des Mindestabstands in %

Richtung Bern	Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen	2.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	21'600	8'000	17'200
	MR	200	200	200
	SV	600	3'100	100
Unterschreitung Mindestabstand (<1.8s) in %	PW+LI	40%	14%	53%
	MR	52%	23%	50%
	SV	35%	13%	50%
Unterschreitung Mindestabstand (<0.9s) in %	PW+LI:	10%	2%	21%
	MR:	24%	8%	27%
	SV:	11%	2%	22%
Einfahrt	Fahrzeuge	Rampe		
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	5'800		
	MR	100		
	SV	400		
Unterschreitung Mindestabstand (<1.8s) in %	PW+LI	38%		
	MR	44%		
	SV	6%		
Unterschreitung Mindestabstand (<0.9s) in %	PW+LI:	9%		
	MR:	18%		
	SV:	1%		

### Gefahrenere Geschwindigkeiten

Die zugelassene Geschwindigkeit wird teilweise überschritten. Die Überschreitungen (>125 km/h) variieren je nach Fahrstreifen und Fahrzeugkategorie zwischen 0 – 34%. Vor allem Fahrzeuge auf dem 2. Überholstreifen sowie Motorräder weisen überhöhte Geschwindigkeiten auf.

Bei der Einfahrt fahren fast keine Fahrzeuge schneller als 80 km/h. Lediglich bei Motorrädern kommt es zu Überschreitungen, anteilmässig jedoch unter 1%. Dies deutet darauf hin, dass zumindest im Bereich der Messstelle (Einfahrtsnase) noch nicht übermässig beschleunigt wird.

**Tab. 4** Beispiel Übergangstyp 1 – Überschreitung Geschwindigkeit in %

Richtung Bern	Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen	2.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	21'600	8'000	17'200
	MR	200	200	200
	SV	600	3'100	100
Überschreitung Geschwindigkeit (>125 km/h) in %	PW+LI	7%	3%	27%
	MR	19%	8%	34%
	SV	k.A.	k.A.	k.A.
Einfahrt	Fahrzeuge	Rampe		
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	5'800		
	MR	100		
	SV	400		
Unterschreitung Geschwindigkeit (<80 km/h) in %	PW+LI	100.0%		
	MR	99.6%		
	SV	100.0%		
Überschreitung Geschwindigkeit (>80 km/h) in %	PW+LI:	0.0%		
	MR:	0.4%		
	SV:	0.0%		

### Objektive Verkehrssicherheit

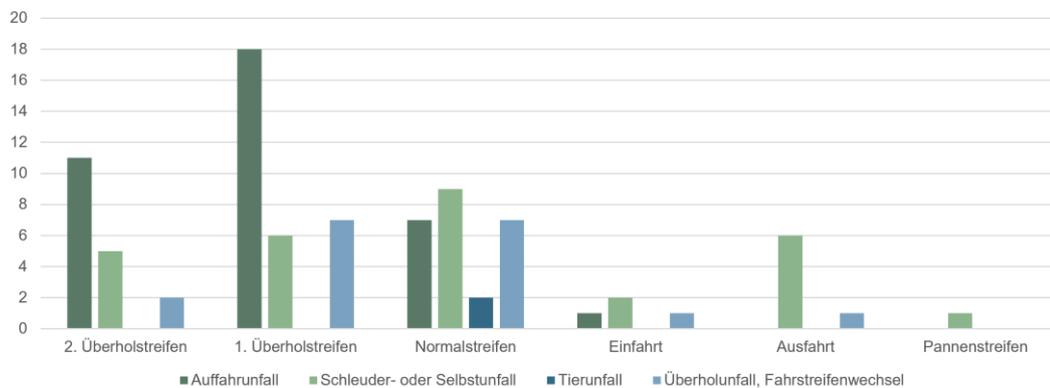
Der Perimeter für die Analyse der Verkehrsunfälle wird auf 2km, je ein Kilometer vor und nach dem Anschluss, festgelegt (siehe Abb. 44). Die Abbildung zeigt alle polizeilich registrierten Verkehrsunfälle im Perimeter in Fahrtrichtung Bern im betrachteten Zeitraum von 2012-2021. Qualitative Gemeinsamkeiten sind nicht zu erkennen.



**Abb. 44** Betrachtungsperimeter und Unfälle im Betrachtungszeitraum (Unfälle sind als Punkte dargestellt)

Im Betrachtungszeitraum wurden 86 Verkehrsunfälle polizeilich registriert. Auf dem 1. und dem 2. Überholstreifen dominieren mit 67% die Auffahrkollisionen, in der Regel verursacht durch Unaufmerksamkeit und Ablenkung (50%) oder zu nahes Aufschliessen (36%). Über alle Fahrstreifen sind 21% der Unfälle Überholunfälle oder Unfälle beim Fahrstreifenwechsel. Die meisten dieser Unfälle (78%) werden auf dem Normalstreifen und dem 1. Überholstreifen registriert (siehe Abb. 45). Als Unfallursache wird am häufigsten mangelnde Rücksichtnahme beim Fahrstreifenwechsel angegeben. Auf dem Einfahrtsstreifen wurden in 10 Jahren nur vier Unfälle registriert. Die zwei Selbst- und Schleuderunfälle wurden auf die nicht angepasste Geschwindigkeit zurückgeführt, eine

Auffahrkollision auf zu nahes Aufschliessen und eine Kollision beim Fahrstreifenwechsel auf nicht gewähren des Vortritts.



**Abb. 45** Polizeilich registrierte Unfälle nach Unfalltyp und Fahrstreifen.

### Subjektive Verkehrssicherheit

Die subjektive Verkehrssicherheit beim Einfahren in die HLS wird beeinflusst von der gefahrenen Geschwindigkeit und deren Konstanz auf der HLS, der Folgezeitlücken und dem Verkehr auf der Einfahrt. Diese Faktoren beeinflussen insbesondere die erwartete Folgeschwere und die Kontrollierbarkeit. Bei der Einfahrt in die HLS ist entscheidend, dass Fahrzeuglenkende eine Lücke zwischen den sich folgenden Fahrzeugen erkennen, die sie zum Einfahren in die HLS nutzen können. Die Folgezeitlücken sind in 40% der Fälle unter 1.8s und damit sehr kurz. Es wird angenommen, dass Menschen Folgezeitlücken von unter 1.8s als klein einstufen und das Einfahren in die HLS als eher unsicher wahrnehmen. Die Folgezeitlücken auf dem Normalstreifen kann der einfahrende Fahrer nicht direkt beeinflussen, was sich negativ auf das subjektive Sicherheitsgefühl auswirkt. Insbesondere Werktags von 16:00 Uhr bis 19:00 Uhr ist zudem die Geschwindigkeit der einzelnen Verkehrsteilnehmer sehr unterschiedlich. Es wird davon ausgegangen, dass die unterschiedlichen Geschwindigkeiten das subjektive Sicherheitsgefühl negativ beeinflussen. Die subjektive Verkehrssicherheit verbessern dürfte der Umstand, dass die meisten Fahrzeuge nicht zu schnell unterwegs sind. Dieser Aspekt kann das subjektive Sicherheitsgefühl erhöhen, weil die erwartete Folgeschwere kleiner ist.

### Fazit zur Analyse

Die Analyse der aktuellen Situation des Beispielabschnitts für den Übergangstyp 1 liefert eine erste Einschätzung hinsichtlich des Auftretens von Übergängen und ihrer Konzeptionierung. Bei der Planung von Übergangstyp 1 ist es unerlässlich, die instabilen Zustände (in diesem Fall 4.5%) und ihre Zeitpunkte im Tages- und Wochenverlauf angemessen zu berücksichtigen. Angesichts der erheblichen Unterschreitung von Folgezeitlücken sowie der Überschreitung von Geschwindigkeiten entsteht die Notwendigkeit, das (menschliche) Verhalten in der Umgebung zu analysieren, um sichere Übergänge vom automatisierten in den konventionellen Fahrbetrieb zu gewährleisten. Aus Sicht der Verkehrssicherheit bildet das Einfahren in die HLS kein Schwerpunkt im Unfallgeschehen. Lediglich vier der 86 Unfälle im gewählten Perimeter des Anschlusses wurden im Bereich der Einfahrt registriert. Die häufigen Auffahrkollisionen auf den Überholstreifen dominieren das Unfallgeschehen im betrachteten Abschnitt.

## 6.2.2 Mögliche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb

Das im Folgenden beschriebene Konzept ist in Abb. 46 dargestellt. Der Fahrer/die Fahrerin wird vor der Einfahrt auf die HLS darauf hingewiesen, dass die Steuerung an das Fahrzeug abgegeben werden kann. Das Fahrzeug empfiehlt dem Fahrer/der Fahrerin diese Übergabe und weist ihn/sie darauf hin, den notwendigen Abstand zum Vorderfahrzeug und

die Geschwindigkeitsbeschränkung einzuhalten. Sobald diese Voraussetzungen erfüllt sind, erfolgt die Übertragung der Steuerung innerhalb von Sekundenbruchteilen. Die Sensorik überwacht während dieses Prozesses kontinuierlich die Umgebung; insbesondere nicht-automatisierte Fahrzeuge müssen beobachtet und ihr Verhalten prognostiziert werden.

Nach der Kontrollübernahme beschleunigt das Fahrzeug, um die gleiche Geschwindigkeit wie auf der Hauptstrecke zu erreichen. Wenn das Ramp Metering aktiv ist (ist im vorliegenden Beispiel zum Anschluss Dietikon bereits heute vorhanden), passt das Fahrzeug die Geschwindigkeit entsprechend optimal an. Gleichzeitig kooperiert das Fahrzeug mit anderen automatisierten Fahrzeugen und tauscht zum Beispiel Informationen über Fahrtrajektorien und Fahrstreifenwechsel aus. In Tab. 5 sind die Betriebskonzepte für zwei unterschiedliche Fälle beschrieben: im ersten Fall besteht ein starker öffentlicher Datenverbund, der das kooperative Einfädeln erleichtert. Im zweiten Fall werden Trajektorien nur unter Fahrzeugen ausgetauscht, die miteinander vernetzt sind.

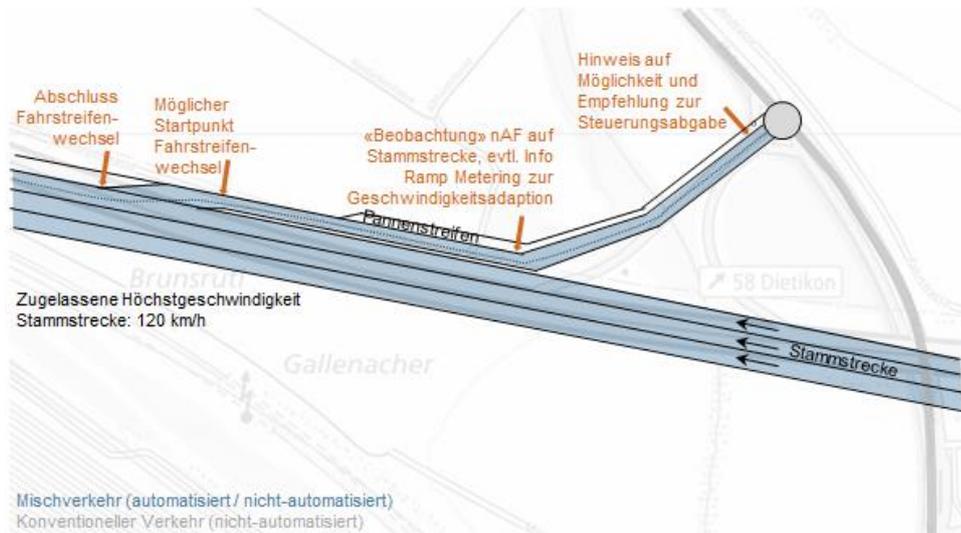


Abb. 46 Übergangstyp 1: Konzept zu Gestaltung und Betrieb, eigene Darstellung

Tab. 5 Übergangstyp 1 – Betriebskonzept je nach Datenverbund

	Fall 1: Starker (öffentlicher) Datenverbund	Fall 2: Lösung auf Ebene Fahrzeuge/Hersteller
Konzept	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrzeug übermittelt dauernd Position und Fahrmodus (Fahrer/in oder AF)</li> <li>Digitale Betriebswechsellpunkte (bspw. Start Übergangsbereich) werden an Fahrzeuge gesendet</li> <li>Parameter des Ramp Meterings (Freigabefenster, optimale Geschwindigkeit) werden bereitgestellt</li> <li>Trajektorien aller vernetzten Fahrzeuge auf der Stammstrecke werden ausgetauscht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebswechsellpunkte werden durch Signale/ Markierungen durch Fahrzeuge erkannt (mehr Ausstattung nötig)</li> <li>Fahrzeug erkennt Signale des Ramp Meterings und verarbeitet diese</li> <li>Trajektorien der Fahrzeuge auf der Stammstrecke werden ausgetauscht, sofern diese V2V-vernetzt sind</li> </ul>
Objektive Verkehrssicherheit	<b>++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)</b>	<b>++ (ggü. heutiger Situation deutliche verbessert)</b>
Subjektive Verkehrssicherheit	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>	<b>++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)</b>
Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit	<b>++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)</b>	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>

## Bewertung der Konzepte

Im Folgenden werden die Auswirkungen des beschriebenen Konzepts auf die objektive und subjektive Verkehrssicherheit sowie Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit beschrieben. Bei der Bewertung werden wo nötig die beiden in Tab. 5 beschriebenen Fälle unterschieden.

- **Objektive Verkehrssicherheit:** Wie oben beschrieben, sind die bei der Einfahrt häufigsten Unfälle Auffahrkollisionen sowie Selbst- und Schleuderunfälle. Automatisierte Fahrzeuge werden diese Art Unfälle weitgehend vermeiden können. Unfälle beim Fahrstreifenwechsel können durch das automatisierte Einfahren auf den rechten Fahrstreifen ebenfalls verhindert werden. Neue Risiken infolge Vernetzung (Fall 1) sind an dieser Stelle eher nicht zu erwarten. Im nicht-vernetzten Szenario (Fall 2) könnten allenfalls Risiken entstehen, wenn das automatisierte Fahrzeug zu vorsichtig fährt und kurze Raum-/Zeitlücken (je nach Fahrzeugkategorie unterschiedlich) entgegen den Erwartungen des nachfolgenden Fahrzeugs nicht nutzt.
- **Subjektive Verkehrssicherheit:** Wird die Fahraufgabe an das Fahrzeug abgegeben, ist das Bedürfnis nach Kontrollierbarkeit kleiner und die Folgeschwere wird ebenfalls als kleiner beurteilt. Dadurch erhöht sich die subjektive Sicherheit insgesamt. Die subjektive Sicherheit nimmt auch für Fahrer/-innen, die selbst fahren, zu, wenn die Fahrzeuge dank eines gewissen Anteils an automatisierten Fahrzeugen auf dem Normalstreifen gleichmässiger fahren. Allerdings könnten sich die erwarteten, kleineren Zeitlücken zwischen vernetzten automatisierten Fahrzeugen (Fall 1) negativ auf das Sicherheitsgefühl auswirken. Da auch die objektive Sicherheit zunimmt, wird erwartet, dass die subjektive Sicherheit angemessener ist als heute.
- **Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit:** Aufgrund der reduzierten Folgezeitlücken und der Kooperation in der Einfahrtzone wird in Fall 1 eine Erhöhung der Kapazitäten erwartet. In Fall 2 wird zwar eine Homogenisierung des Verkehrsflusses durch die automatisierten Fahrzeuge erwartet, nicht aber geringere Folgezeitlücken und eine umfassende Kooperation beim Einfädeln. Damit wird in Fall 2 nur eine geringe Verbesserung der Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit erwartet.

## 6.3 Übergangstyp 2: Verlassen der HLS

Der Übergangstyp 2 betrachtet das Verlassen der HLS, sprich das Verlassen der Autobahn über die Ausfahrtsrampe. Eine Implementierung des automatisierten Fahrens bei diesem Übergang würde bedeuten, dass Fahrzeuge auf der Autobahn im automatisierten Modus fahren und unmittelbar vor dem Verlassen der Autobahn auf eine manuelle Steuerung umgeschaltet wird.

### 6.3.1 Ausgangslage

Als Beispielabschnitt für den Übergangstyp 2 wurde der Anschluss Dietikon auf der N1 ausgewählt (siehe Abb. 47). Um das Verlassen der Autobahn zu analysieren, wurden Detektorzählungen auf der Ausfahrtsrampe (lila gekennzeichnet) sowie auf der gleichgerichtet verlaufenden Autobahnstrecke in Richtung Bern (blau gekennzeichnet) betrachtet.

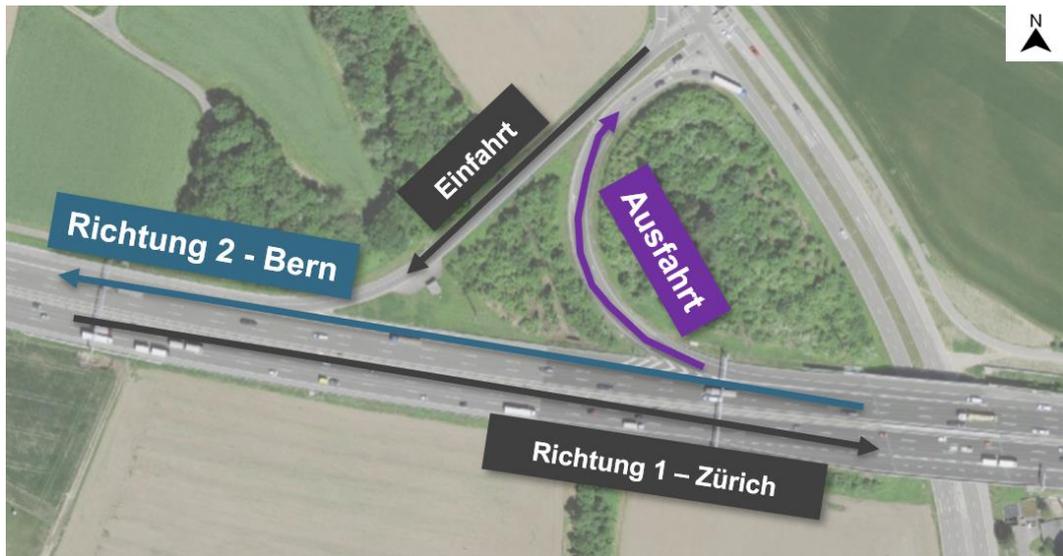


Abb. 47 Beispiel Übergangstyp 2: Anschluss Dietikon, eigene Darstellung

### Verkehrsnachfrage

Beim Anschluss Dietikon verlassen 9'000 von 55'800 Personen- und Lieferfahrzeuge pro Tag mit Fahrtrichtung Bern die N1 (siehe Abb. 48). Dies entspricht rund 16% des gesamten Verkehrsaufkommens in Fahrtrichtung Bern unmittelbar vor der Ausfahrt. In der Spitzenstunde verlassen über alle Fahrzeugkategorien hinweg rund 540 Fahrzeuge die N1. Der Anschluss Dietikon kann somit als hochbelasteter Anschluss bezeichnet werden.

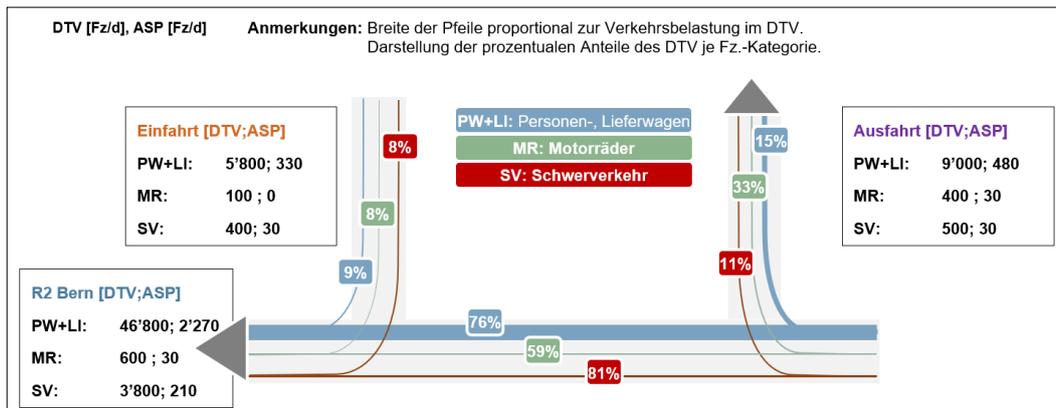


Abb. 48 Beispiel Übergangstyp 2 – Verkehrsbelastung DTV [Fz/d], ASP [Fz/h] für Ein- und Ausfahrt sowie Fahrtrichtung Bern, eigene Darstellung

Für die Ausfahrtsrampe liegen keine detaillierten Auswertungen zu den Tagesganglinien, dem Verkehrszustand und der Konstanz der Geschwindigkeiten vor. Daher werden für Übergangstyp 2 die Auswertungen in Richtung Bern, gemäss Übergangstyp 1 (siehe Kapitel 6.2), berücksichtigt.

### Folgezeitlücken

Die Auswertungen zu den minimalen Folgezeitlücken für den Anschluss Dietikon in Richtung Bern können dem Kapitel 6.2.1 entnommen werden.

Bei Betrachtung der Ausfahrt unterschreitet ca. ein Drittel der Personen- und Lieferwagen sowie der Motorräder die minimale Folgezeitlücke (<1.8s).

**Tab. 6** Beispiel Übergangstyp 2 – Unterschreitung des Mindestabstands in %

Ausfahrt	Fahrzeuge	Rampe
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	9'000
	MR	400
	SV	500
Unterschreitung Mindestabstand (<1.8s) in %	PW+LI	33%
	MR	30%
	SV	10%
Unterschreitung Mindestabstand (<0.9s) in %	PW+LI:	11%
	MR:	10%
	SV:	2%

### Gefahrenere Geschwindigkeiten

Die Auswertungen zur Überschreitung der Geschwindigkeit für den Anschluss Dietikon in Richtung Bern können dem Kapitel 6.2.1 entnommen werden.

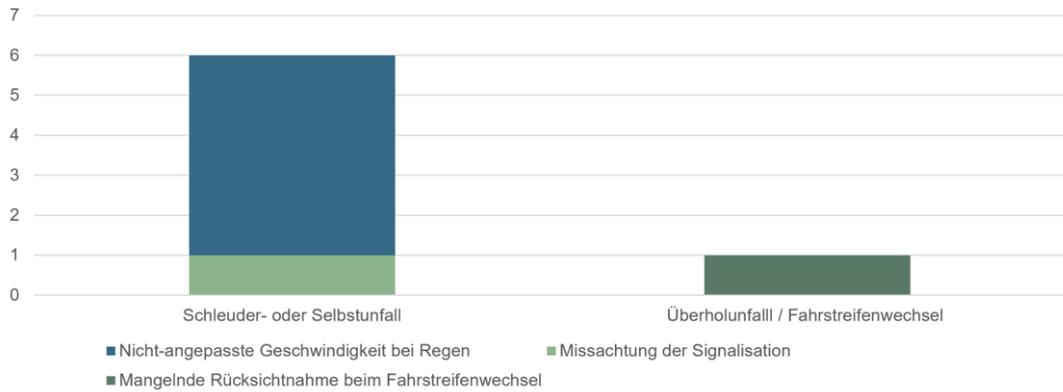
Bei Betrachtung der Ausfahrt fahren lediglich unter 1% der Fahrzeuge schneller als 80 km/h. Dies deutet darauf hin, dass auf der Ausfahrtsrampe, zumindest im Bereich der Messstelle (Ausfahrtsnase), ausreichend verzögert wird.

**Tab. 7** Beispiel Übergangstyp 2 – Überschreitung Geschwindigkeit in %

Ausfahrt	Fahrzeuge	Rampe
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	9'000
	MR	400
	SV	500
Unterschreitung Geschwindigkeit (<80 km/h) in %	PW+LI	99.7%
	MR	99.7%
	SV	99.8%
Überschreitung Geschwindigkeit (>80 km/h) in %	PW+LI:	0.3%
	MR:	0.3%
	SV:	0.2%

### Objektive Verkehrssicherheit

Der Perimeter wird identisch gewählt wie bereits bei der Einfahrt (siehe Abb. 44). Somit bilden die bereits beschriebenen 86 Unfälle in zehn Jahren die Basis der Analyse. Auf der Ausfahrtsrampe wurden sieben Unfälle registriert, wobei sechs der Unfalltyp-Gruppe Schleuder- oder Selbstunfall zugeordnet wurden (siehe Abb. 49). Als Hauptursachenuntergruppe dominiert die nicht-angepasste Geschwindigkeit, wobei alle diese Unfälle bei Regen verursacht wurden.



**Abb. 49:** Unfalltypengruppe und Unfallursachen der Unfälle auf der Ausfahrtsrampe

### Subjektive Verkehrssicherheit

Bei der Ausfahrt wird die subjektive Sicherheit durch die tiefere Geschwindigkeit von signalisierten 80 km/h positiv beeinflusst (erwartete Folgeschwere ist kleiner). Nur gerade 0.3% der Fahrzeuge fahren zu schnell, was sich positiv auf die subjektive Verkehrssicherheit auswirkt. Die Folgezeitlücken von 1.8s werden von einem Drittel der Fahrzeuglenkenden unterschritten. Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuglenkenden die Situation als ausreichend sicher wahrnehmen, da in der Situation der Ausfahrt insbesondere der Abstand zum Vorderfahrzeug beobachtet wird und dieser von der lenkenden Person selbst gewählt wird. Aufgrund der erlebten Kontrollierbarkeit wird davon ausgegangen, dass die kurzen Folgezeitlücken bei diesem Übergangstyp weniger Einfluss auf die subjektive Verkehrssicherheit haben.

### Fazit zur Analyse

Die Analyse der aktuellen Situation des Beispielabschnitts für den Übergangstyp 2 liefert eine erste Einschätzung hinsichtlich des Auftretens von Übergängen und ihrer Konzeptionierung. Bei der Planung von Übergangstyp 2 ist es unerlässlich, die instabilen Zustände (in diesem Fall 4.5%) und ihre Zeitpunkte im Tages- und Wochenverlauf angemessen zu berücksichtigen. Angesichts der erheblichen Unterschreitung von Folgezeitlücken sowie der Überschreitung von Geschwindigkeiten entsteht die Notwendigkeit, das (menschliche) Verhalten in der Umgebung zu analysieren, um sichere Übergänge vom automatisierten in den konventionellen Fahrbetrieb zu gewährleisten. Die Unfälle auf der Ausfahrt werden mehrheitlich den Selbst- oder Schleuderunfällen zugeordnet und werden insbesondere durch nicht angepasste Geschwindigkeiten bei Regen verursacht.

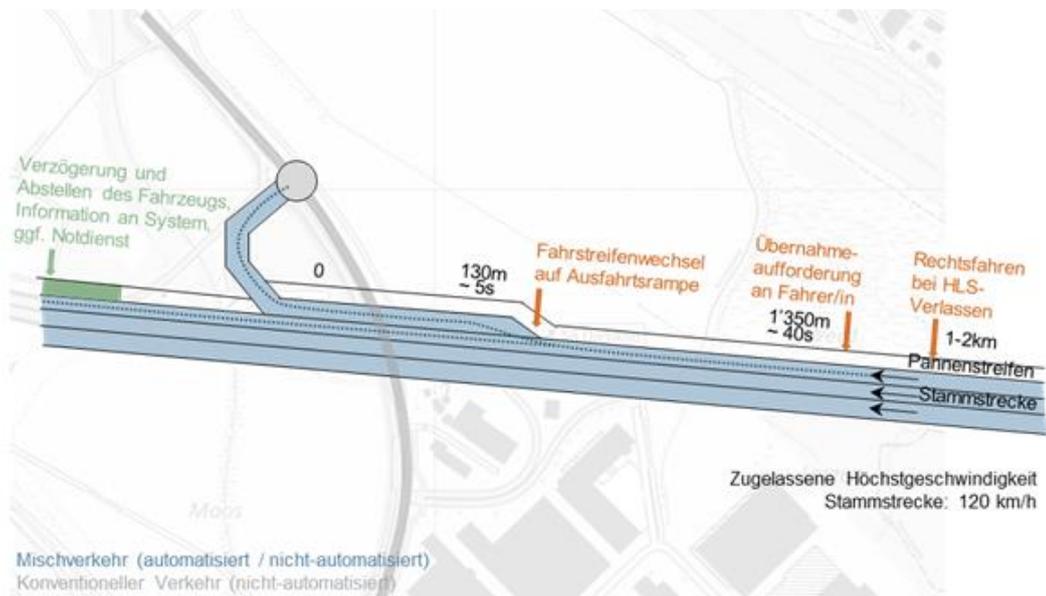
## 6.3.2 Mögliche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb

Das im Folgenden beschriebene Konzept ist in Abb. 50 dargestellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die geplante Route des Fahrzeugs bekannt ist und es sich beim Übergang im Vorfeld der Ausfahrt von der HLS somit um eine erwartbare Kontrollübergabe handelt. Spätestens 40 Sekunden vor Erreichen der Ausfahrtsrampe erfolgt die Aufforderung zur Übernahme durch den Fahrer/die Fahrerin. Zu diesem Zeitpunkt muss das Fahrzeug bereits auf den rechten Fahrstreifen gewechselt sein und einen ausreichenden Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhalten, sodass der Fahrer/die Fahrerin die Kontrolle ohne grössere Herausforderungen übernehmen kann. Im Zusammenhang mit der Aufforderung zur Kontrollübernahme werden die Nebenaktivitäten für den Fahrer/die Fahrerin eingeschränkt, zum Beispiel wird das Abspielen von Filmen gestoppt und der Fahrersitz aufrecht gestellt. Zudem erfolgt eine geringfügige Geschwindigkeitsreduzierung (von 120 auf 100 km/h für PW/LI, für den SV keine Reduktion, d. h. 80 km/h). Die Übernahme durch den Fahrer/die Fahrerin sollte vor Erreichen der Ausfahrtsrampe (an der durchgezogenen Linie) erfolgen. Um hektische Fahrmanöver zu vermeiden, könnte die Übernahmefunktion auf Höhe der Ausfahrt (an der

durchgezogenen Linie) blockiert werden. Diese Blockade könnte allerdings beim Fahrer/der Fahrerin zu einem Kontrollverlust führen und es ist fraglich, ob eine solche Blockade rechtlich zulässig ist.

Falls der Fahrer/die Fahrerin nicht reagiert, wechselt das Fahrzeug nicht auf die Ausfahrtsrampe, sondern fährt über die Anschlussstelle hinaus und wartet erneut auf eine Übernahme. Der Grund hierfür ist, dass nach Verlassen der HLS keine Möglichkeit mehr für ein risikominimales Manöver besteht. Bei fortwährender Nichtreaktion des Fahrers/der Fahrerin wird von einem medizinischen Notfall ausgegangen. Das Fahrzeug lenkt in diesem Fall auf den Pannestreifen, indem es die Rückfallebene aktiviert.

Im vorgeschlagenen Betriebskonzept ist keine zusätzliche Infrastruktur erforderlich. Wie in Tab. 8 dargestellt, werden auch hier wieder zwei verschiedene Fälle im Hinblick auf die Vernetzung mit der Infrastruktur unterschieden und im Folgenden bewertet.



**Abb. 50** Beispiel Übergangstyp 2: Konzept zu Gestaltung und Betrieb, eigene Darstellung

**Tab. 8** Beispiel Übergangstyp 2 – Betriebskonzept je nach Datenverbund

	<b>Fall 1: Starker (öffentlicher) Datenverbund</b>	<b>Fall 2: Lösung auf Ebene Fahrzeuge/Hersteller</b>
Konzept	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrzeug übermittelt dauernd Position und Fahrmodus (Fahrer/in oder AF)</li> <li>Digitale Betriebswechsellpunkte (bspw. Start Übergangsbereich) werden an Fahrzeuge gesendet</li> <li>Übernahmeblockade wird temporär gesendet</li> <li>Pannestreifenangaben werden bereitgestellt</li> <li>Fahrzeug sendet Beginn und Abschluss Manöver risikominimaler Zustand</li> <li>Wenn notwendig: Auslösung Rückfallebene bzw. Bestätigung Rückfallebene und Notfall durch System</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betriebswechsellpunkte werden durch Signale/Markierungen durch Fahrzeuge erkannt (mehr Ausstattung nötig)</li> <li>Fahrzeug erkennt Sicherheitslinie und löst auf dieser Basis eine Übernahmeblockade aus</li> <li>Pannestreifen müssen durch Fahrzeug erkannt oder durch Hersteller als Datensatz bereitgestellt werden</li> <li>Fahrzeug löst Rückfallebene durch Notfallanruf aus</li> </ul>
Obj. Verkehrssicherheit	<b>++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)</b>	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>

Subj. Verkehrssicherheit	+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)	+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)
Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit	++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)	++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)

### Bewertung der Konzepte

Im Folgenden werden die Auswirkungen des beschriebenen Konzepts auf objektive und subjektive Verkehrssicherheit sowie Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit beschrieben. Bei der Bewertung werden wo nötig die beiden in Tab. 8 beschriebenen Fälle unterschieden.

- **Objektive Verkehrssicherheit:** Die bei der Ausfahrt häufigsten Unfälle sind Auffahrkollisionen, Selbst- und Schleuderunfälle. Automatisierte Fahrzeuge werden diese Art Unfälle weitgehend vermeiden können. Zudem wird ab ca. 1'350 Metern vor der Ausfahrt (entspricht ca. 40 Sekunden) rechts gefahren, sodass Unfälle aufgrund von späten Fahrstreifenwechseln vermieden werden können. Um zu verhindern, dass sich neue Unfallmöglichkeiten an dem Ort ergeben könnten, an dem die Übergabe der Kontrolle an den Fahrer erfolgt und sich der kritische Punkt auf diese Weise lediglich von der Ausfahrt stromaufwärts verlagert, fädelt das Fahrzeug frühzeitig und selbstständig rechts ein und übergibt die Kontrolle an den Fahrer/die Fahrerin in einer Situation mit leicht reduzierter Geschwindigkeit und einer ausreichenden Folgezeitlücke. Allenfalls riskantes Verhalten und kurzfristige Überholmanöver des Fahrers nach der Kontrollübernahme können durch das System nicht verhindert werden. Die Kontrollübernahme auf dem rechten Fahrstreifen macht hier aber einen erneuten Fahrstreifenwechsel nach links nötig und sollte damit die Häufigkeit der späten Einfädelprozesse dennoch reduzieren. Zusätzliche Risiken (Fehlfunktion des Automatisierungssystems) sind eher nicht zu erwarten. In Fall 2 könnten gewisse Unfälle durch teilweise fehlende Informationen (Strassenzustand, Hindernisse auf der Fahrbahn, etc.) allenfalls nicht verhindert werden.
- **Subjektive Verkehrssicherheit:** Die subjektive Sicherheit nimmt leicht zu, wenn die Fahrzeuge dank einem gewissen Anteil an automatisierten Fahrzeugen auf dem rechten Fahrstreifen gleichmässiger fahren. Da auch die objektive Sicherheit zunimmt, wird erwartet, dass die subjektive Sicherheit angemessener sein wird.
- **Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit:** Im vorgeschlagenen Konzept kann hektisches Verhalten in der Verflechtungszone mit spontanen Fahrstreifenwechseln deutlich reduziert und der Verkehr auf dem rechten Fahrstreifen durch die Reduktion der Geschwindigkeit auf 100 km/h (für PW/LI) homogenisiert werden. Vom starken Datenverbund in Fall 1 ist hier kein Vorteil bzgl. Kooperation/Folgezeitlücken zu erwarten, da hier die Vorbereitung auf die Kontrollübergabe zum menschlichen Fahrer erfolgt und demnach grössere Folgezeitlücken eingehalten werden müssen. Der umfangreiche Datenverbund bietet allenfalls Vorteile, da das Fahrzeug bei überlasteten Anschlussknoten dynamisch eine passendere Route planen könnte.

## 6.4 Übergangstyp 3: Aktivierung der Fahrstreifensteuerung

Der Übergangstyp 3 betrachtet die Fahrstreifensteuerung. Dabei wird davon ausgegangen, dass zusätzliche Fahrstreifen, die durch das Programm Engpassbeseitigung des Bundes realisiert werden, bei einer hohen Durchdringung der Flotte mit automatisierten Fahrzeugen nur von solchen befahren werden dürfen. Dies würde bedeuten, dass die automatisierten Fahrzeuge von einem Zustand mit Mischverkehr mit konventionellen Fahrzeugen in einen Zustand mit ausschliesslich automatisierten Fahrzeugen übergehen.

### 6.4.1 Ausgangslage

Als Beispielabschnitt für den Übergangstyp 3 wurde der Abschnitt "Melide/Bissone – Mendrisio" auf der N2 ausgewählt (siehe Abb. 51). Das ASTRA plant auf dem Abschnitt eine Engpassbeseitigung durch eine Pannestreifenumnutzung (abschnittsweise) sowie den Bau einer 2. Tunnelröhre. Der bestehende Engpass betrifft zwei Tunnel sowie den Damm von Melide. Die Überlastungen auf diesem Abschnitt sind auf beiden Fahrrichtungen ähnlich stark. Um die "Aktivierung der Fahrstreifensteuerung" zu analysieren, wurden Detektorzählungen auf der Autobahnstrecke Richtung Mendrisio/Chiasso (rot gekennzeichnet) sowie auf der Autobahnstrecke in Richtung Melide/Airolo (blau gekennzeichnet) betrachtet.



Abb. 51 Beispiel Übergangstyp 3: "Melide/Bissone – Mendrisio", eigene Darstellung

#### Verkehrsnachfrage

Auf dem Abschnitt "Melide/Bissone – Mendrisio" fahren 28'800 Personen- und Lieferfahrzeuge pro Tag Richtung Norden und 28'700 Richtung Süden (siehe Abb. 52). Demnach ist die Verkehrsbelastung der beiden Fahrrichtungen am Tag in etwa ähnlich hoch. In der Spitzenstunde sind hingegen Unterschiede zu beobachten: Während über alle Fahrzeugkategorien hinweg rund 1'130 Fahrzeuge in der Abendspitze in Richtung Melide/Airolo fahren, verkehren abends in Richtung Mendrisio/Chiasso rund doppelt so viele Fahrzeuge. Die Lastrichtung zeigt also in Richtung Süden.

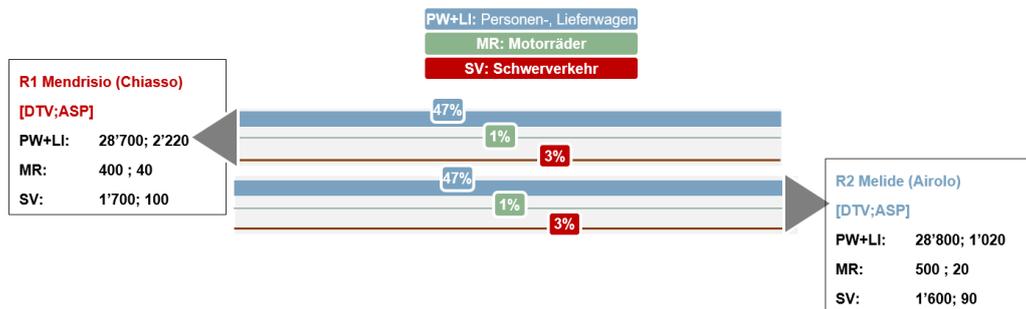


Abb. 52 Beispiel Übergangstyp 3 - Verkehrsbelastung DTV [Fz/d], ASP [Fz/h] Fahrrichtung Mendrisio (Chiasso) und Melide (Airolo), eigene Darstellung

Bei Betrachtung der Tagesganglinien auf Basis der PW-Fahrzeuge pro Tag im 15-Minuten-Intervall in Fahrrichtung Mendrisio und Melide bestätigt sich die Beobachtung, dass in Fahrrichtung Süden (Chiasso) die werktägliche Abendspitze ausgeprägter ist als die Morgenspitze. In Fahrrichtung Norden (Airolo) ist hingegen die werktägliche Morgenspitze ausgeprägter als die Abendspitze. Demnach zeichnen sich die höchsten

Verkehrsbelastungen im Wochenschnitt vor allem an den Werktagen ab. Dies kann auf den hohen Anteil an Berufspendler/-innen, insbesondere aus dem benachbarten Ausland, zurückgeführt werden.

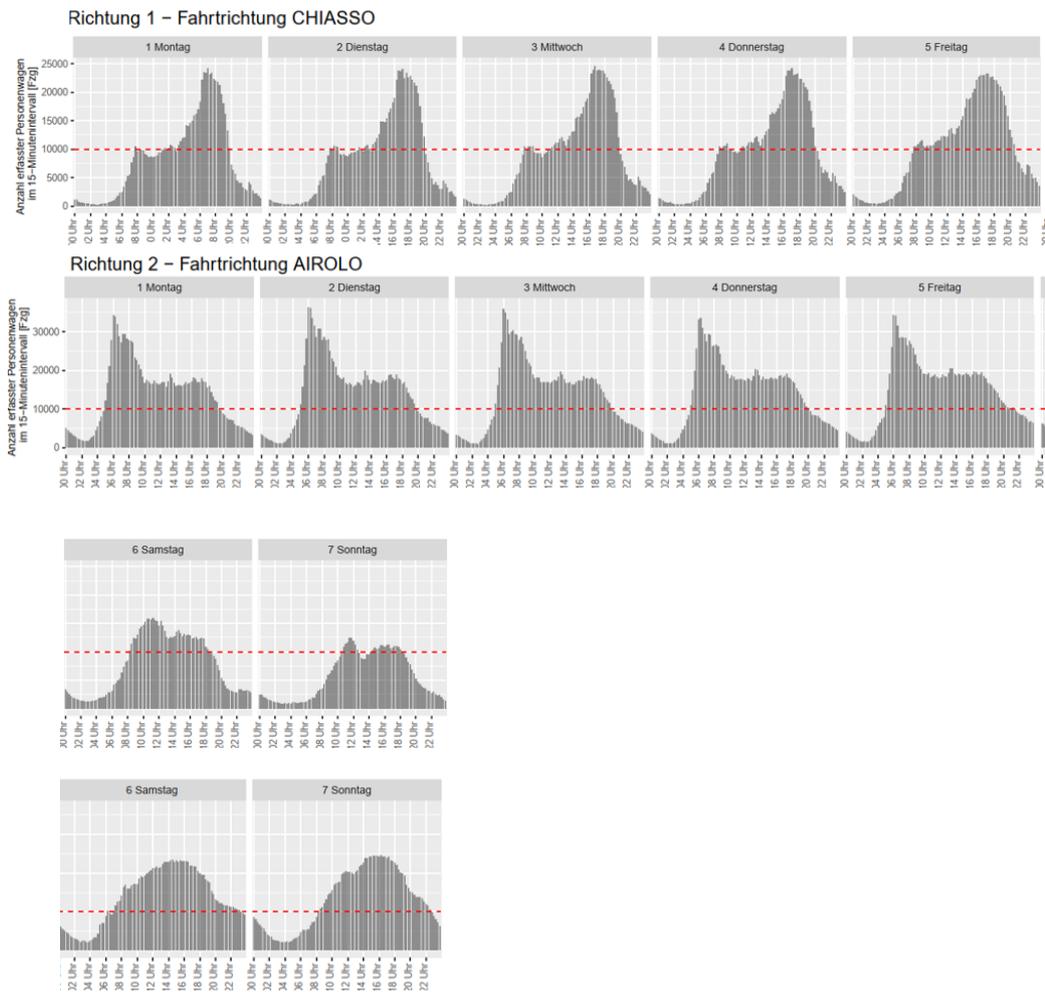
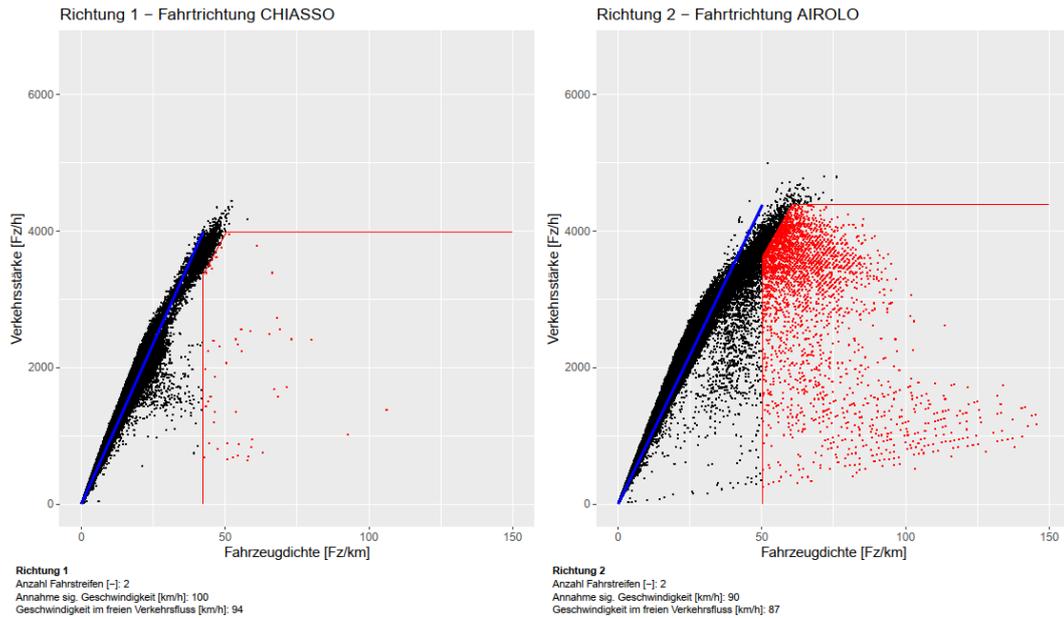


Abb. 53 Beispiel Übergangstyp 3 – Tagesganglinien im DTV [Fz/d], eigene Darstellung

### Verkehrszustand

Von insgesamt 87'926 bewerteten Zeitintervallen in Fahrtrichtung Melide (Chiasso) können lediglich 0.1% dem instabilen Zustand zugeordnet werden (vgl. Abb. 54). Für die Fahrtrichtung Melide (Airolo) können von insgesamt 90'240 bewerteten Zeitintervallen 3.3% dem instabilen Zustand zugeordnet werden. Demnach kommt es trotz ähnlicher Verkehrsbelastungen insbesondere in Fahrtrichtung Norden zu mehr Stausituationen.

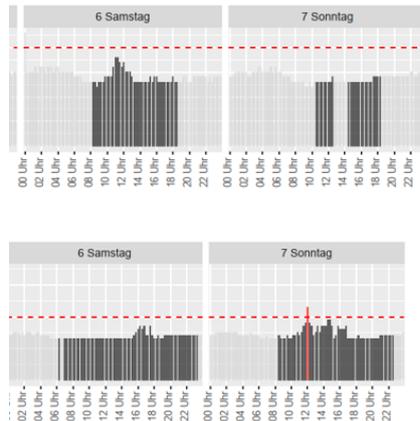


**Abb. 54** Beispiel Übergangstyp 3 – Fundamentaldiagramm zum Verkehrszustand für Fahrtrichtung Mendrisio (Chiasso) und Melide (Airolo), eigene Darstellung

### Konstanz der Geschwindigkeit

Dies bestätigt auch die Betrachtung der mittleren Geschwindigkeit. Eine Abweichung der Zielstreuung ist nur bei der werktäglichen Morgenspitze in Fahrtrichtung Airolo zu beobachten. Demnach treten zu diesem Zeitpunkt werktags hohe Abweichungen der mittleren Geschwindigkeiten auf (siehe Abb. 55). In Fahrtrichtung Chiasso sowie am Wochenende sind fast keine Überschreitungen der Zielstreuung identifizierbar, was auf eine hohe Stabilität des Verkehrsbaus hinweist.





**Abb. 55** Beispiel Übergangstyp 3 – Konstanz der Geschwindigkeit, eigene Darstellung

### Folgezeitlücken

Die sicherheitsbedingten minimalen Folgezeitlücken werden bei konventionellen Fahrzeugen auf allen Fahrstreifen sowohl in Richtung Mendrisio als auch in Richtung Melide unterschritten. Die Unterschreitungen variieren je nach Fahrstreifen und Fahrzeugkategorie zwischen 23 – 56% (bei Betrachtung <1.8 Sekunden). Dabei sind insbesondere auf dem 1. Überholstreifen in beiden Fahrrichtungen höhere Unterschreitungen festzustellen. Zudem weisen Motorradfahrende tendenziell einen höheren Anteil an tiefen Folgezeitlücken auf. Die Sensitivitätsanalyse beider Fahrrichtungen mit einer Zeitlücke von 0.9s bestätigt diese Beobachtung.

**Tab. 9** Beispiel Übergangstyp 3 – Unterschreitung des Mindestabstands in %

Richtung Mendrisio Fahrzeuge (Chiasso)		Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	15'000	14'900
	MR	300	500
	SV	1'600	100
Unterschreitung Mindestabstand (<1.8s) in %	PW+LI	32%	52%
	MR	38%	56%
	SV	23%	34%
Unterschreitung Mindestabstand (<0.9s) in %	PW+LI:	9%	22%
	MR:	16%	35%
	SV:	5%	14%
Richtung Melide Fahrzeuge (Airolo)		Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	16'000	16'200
	MR	400	400
	SV	1'600	100
Unterschreitung Mindestabstand (<1.8s) in %	PW+LI	27%	49%
	MR	38%	52%
	SV	22%	29%
Unterschreitung Mindestabstand (<0.9s) in %	PW+LI:	6%	21%
	MR:	15%	31%
	SV:	5%	11%

### Gefahrenere Geschwindigkeiten

Die zugelassene Geschwindigkeit wird bei beiden Fahrrichtungen kaum überschritten. Die Überschreitungen (>125 km/h) variieren je nach Fahrstreifen und Fahrzeugkategorie

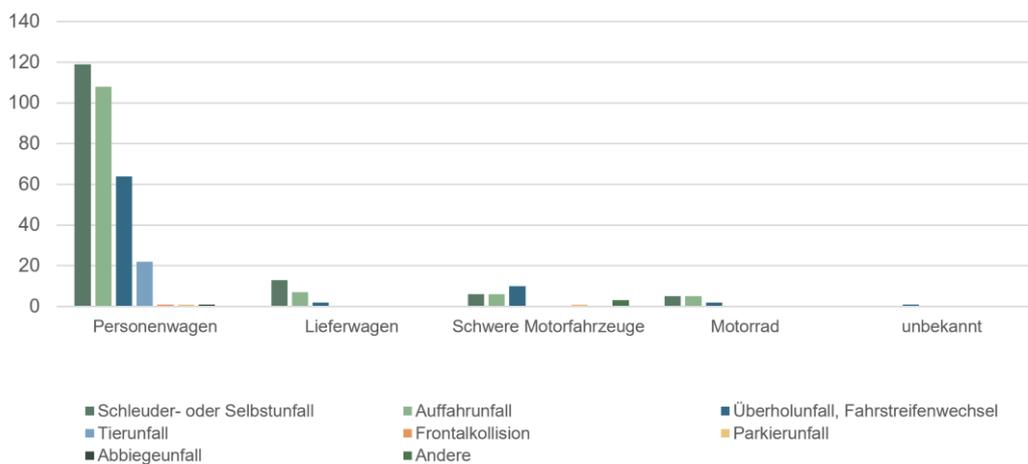
lediglich zwischen 0 – 13%. Vor allem Motorräder weisen überhöhte Geschwindigkeiten auf.

**Tab. 10** Beispiel Übergangstyp 3 – Überschreitung Geschwindigkeit in %

Richtung Mendrisio (Chiasso)		Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI		13'000	13'200
	MR		200	300
	SV		400	100
Überschreitung Geschwindigkeit (>125 km/h) in %	PW+LI		1%	7%
	MR		9%	10%
	SV		0%	k.A. (Wert unplausibel)
Richtung Melide (Airolo)		Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI		11'200	10'200
	MR		300	200
	SV		1'100	100
Überschreitung Geschwindigkeit (>125 km/h) in %	PW+LI		1%	3%
	MR		9%	13%
	SV		0%	k.A. (Wert unplausibel)

### Objektive Verkehrssicherheit

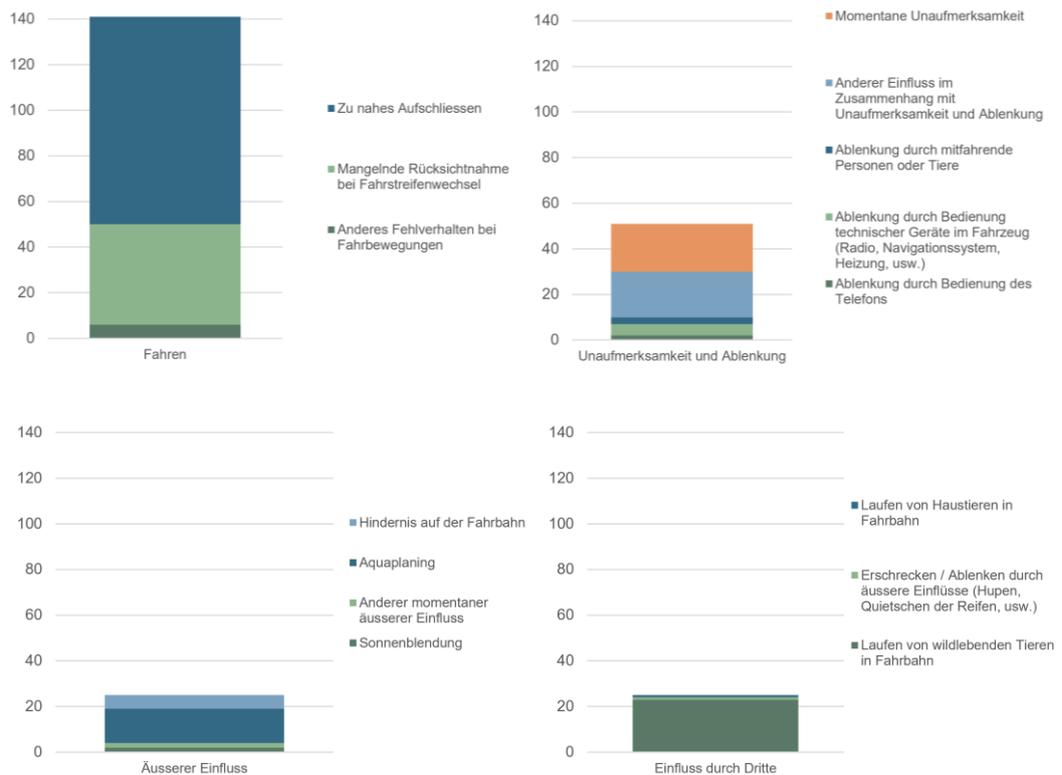
Die Analyse der Verkehrsunfälle umfasst die Autobahn im Bereich der Koordinaten: 2'717'000 E – 2'720'410 E und 1'081'380 N – 1'090'120N und damit den Bereich der Nationalstrasse N2 zwischen den Anschlüssen Melide und Mendrisio. Der Abschnitt umfasst ca. 10 km. In diesem Bereich wurden in den Jahren 2012 – 2021 total 377 Unfälle verursacht. 338 Unfälle wurden von PW oder LI verursacht (siehe Abb. 56). Dabei wurden 123 Personen leicht und 9 Personen erheblich verletzt.



**Abb. 56** Hauptverursacher und Unfalltypgruppe der Unfälle zwischen Melide und Mendrisio.

39% der Unfälle von PW und LI waren Schleuder- oder Selbstunfälle, 34% Auffahrkollisionen und als dritthäufigste Unfalltypengruppe wurde mit 20% Überholunfälle und Unfälle beim Fahrstreifenwechsel festgestellt. Bei 69% der Unfälle, die von PW und LI verursacht wurden, liegt die Hauptursache beim Verhalten der Person. In dieser Gruppe wurden neben zu nahem Aufschliessen (27%) und Unaufmerksamkeit und Ablenkung (15%) in 13% der Unfälle mangelnde Rücksichtnahme beim Fahrstreifenwechsel als Hauptunfallursache festgestellt. Die Unfalltypengruppen und die Unfalltypen sind in

Abb. 57 dargestellt. Die nicht angepasste Geschwindigkeit spielt im Vergleich zu den erwähnten Unfallursachen eine untergeordnete Rolle.



**Abb. 57** Hauptunfallursachengruppe und Aufteilung in Hauptunfallursache auf der A2 zwischen Melide und Mendrisio.

### Subjektive Verkehrssicherheit

Die gefahrene Geschwindigkeit von PW und LI liegt sowohl auf dem Normalstreifen wie auch auf dem Überholstreifen in über 90% unter 125 km/h. Diese nicht massiv überhöhten Geschwindigkeiten dürften einen positiven Einfluss auf das subjektive Sicherheitsgefühl der Verkehrsteilnehmenden, insbesondere auf die erwartete Folgeschwere haben. Die Folgezeiten von 1.8s werden hingegen auf dem Überholstreifen in mehr als der Hälfte der Fälle unterschritten und auch auf dem Normalstreifen werden die 1.8s Abstand in 32% der Fälle unterschritten. Die nahen Abstände beeinflussen das Sicherheitsgefühl der jeweils Vorausfahrenden negativ, weil die Kontrollierbarkeit und die Vermeidbarkeit eines Unfalls als kleiner beurteilt wird.

### Fazit zur Analyse

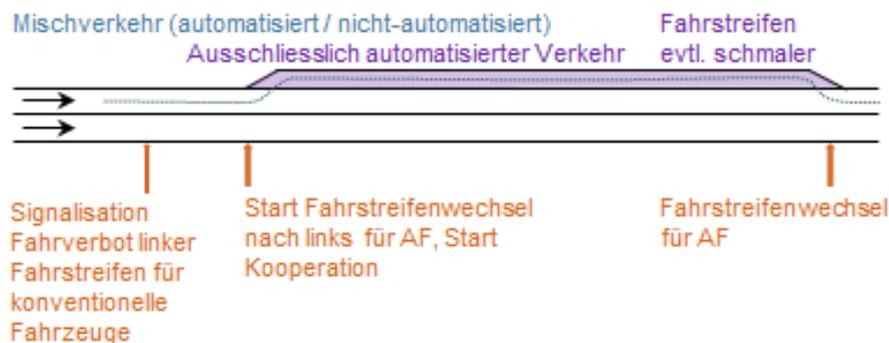
Die Analyse der aktuellen Situation des Beispielabschnitts für den Übergangstyp 3 liefert eine erste Einschätzung hinsichtlich des Auftretens von Übergängen und ihrer Konzeptionierung. Bei der Planung von Übergangstypen 3 ist es unerlässlich, die instabilen Zustände (in diesem Fall 3.3% in Fahrtrichtung Melide) und ihre Zeitpunkte im Tages- und Wochenverlauf angemessen zu berücksichtigen. Angesichts der Unterschreitung von Folgezeitlücken entsteht die Notwendigkeit, das (menschliche) Verhalten in der Umgebung zu analysieren, um sichere Übergänge vom automatisierten in den konventionellen Fahrbetrieb zu gewährleisten. Eine geringe Überschreitung der Geschwindigkeit stellt hierzu ein weiteres Indiz dar. Die Unfallanalyse zeigt, dass auf diesem Abschnitt neben den Schleuder- und Selbstunfällen sowie den Auffahrkollisionen insbesondere auch die Überholunfälle und Unfälle beim Fahrstreifenwechsel relativ häufig polizeilich registriert werden. Mangelnde Rücksichtnahme beim Fahrstreifenwechsel und zu nahes Aufschliessen als häufige Unfallursachen, sowie die Messung der Unterschreitung der

Folgezeitlücken von 1.8s zeigen die Herausforderung für automatisierte Fahrzeuge in diesem Abschnitt.

## 6.4.2 Mögliche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb

Das im Folgenden beschriebene Konzept ist in Abb. 58 dargestellt und in Tab. 11 kurz beschrieben. Bei der Kontrollübergabe an das automatisierte Fahrsystem im Vorfeld der Nutzung eines Sonderfahrstreifens handelt es sich um eine erwartbare Kontrollübergabe vom Fahrer/der Fahrerin an das automatisierte Fahrsystem. In Fall 1 (starker öffentlicher Datenverbund) teilt die Infrastruktur Informationen über den Sonderbetrieb des Fahrstreifens im Datenverbund. Das Fahrzeug gibt basierend auf der geplanten Route und der daraus resultierenden Distanz zur relevanten Ausfahrt von der HLS eine Empfehlung ab, ob die Nutzung des zusätzlichen Fahrstreifens sinnvoll ist. Im Fall 2 wird der Betrieb des Fahrstreifens durch Signale, Markierungen, LED-Anzeigen auf dem Boden oder überkopf angezeigt und durch das Fahrzeug erkannt. In beiden Fällen weist das Fahrzeug den Fahrer/die Fahrerin auf die Möglichkeit der Kontrollübergabe zur Nutzung des zusätzlichen Fahrstreifens hin. Das Fahrzeug weist ihn/sie zudem darauf hin, den notwendigen Abstand zum Vorderfahrzeug und die Geschwindigkeitsbeschränkung einzuhalten. Sobald diese Voraussetzungen erfüllt sind, erfolgt die Übertragung der Steuerung innerhalb von Sekundenbruchteilen. Die Sensorik überwacht während dieses Prozesses kontinuierlich die Umgebung; insbesondere nicht-automatisierte Fahrzeuge müssen beobachtet und ihr Verhalten prognostiziert werden. Nach der Kontrollübernahme wechselt das Fahrzeug sobald möglich auf den zusätzlichen Fahrstreifen.

Eine Signalisation des Fahrstreifens ist notwendig, um deutlich zu machen, dass der Fahrstreifen nicht von nicht-automatisierten Fahrzeugen genutzt werden darf. Interessant wäre auch eine Verknüpfung des Nutzungsrechts des zusätzlichen Fahrstreifens mit der Zustimmung zur Kontrollabgabe in kritischen Zonen (vgl. Abschnitt 6.5), um dort infolge der Homogenisierung Kapazitätsgewinne zu erzielen. Trotz Nutzungsbeschränkung auf dem zusätzlichen Fahrstreifen müssen nicht-automatisierte Fahrzeuge auf dem Nachbarfahrstreifen beobachtet und ihr Verhalten prognostiziert werden, um die Sicherheit zu gewährleisten. Im Pannenfall auf dem Sonderfahrstreifen wird der Fahrstreifen für alle Fahrzeuge gesperrt und als Pannestreifen genutzt.



**Abb. 58** Übergangstyp 3: Konzept zu Gestaltung und Betrieb, eigene Darstellung

Das erarbeitete Konzept gilt nur für Personenwagen, welche die erlaubten Höchstgeschwindigkeiten erreichen. Da beim Schwerverkehr die zugelassene Höchstgeschwindigkeit aus Sicherheitsgründen aufgrund des physikalisch bedingten erhöhten Bremsweges gegenüber Personenwagen limitiert ist, würde eine gemeinsame Nutzung des zusätzlichen Fahrstreifens zu Konflikten zwischen Personenwagen und Lastwagen führen und die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen. Automatisierte Lastwagen sollten den zusätzlichen Fahrstreifen daher nicht befahren, obwohl sie in der Regel im Vergleich mit Personenwagen längere Strecken zurücklegen und somit gute Voraussetzungen für die Benutzung des zusätzlichen Fahrstreifens mitbringen würden (anteilmässig weniger Fahrstreifenwechsel). Längerfristig und bei beinahe vollständiger Durchdringung könnte jedoch eine Zuordnung der verschiedenen Fahrstreifen nach

Fahrzeugtyp erfolgen, sodass auch für den automatisierten Schwerverkehr ein Fahrstreifen bereitgestellt werden könnte.

**Tab. 11** Übergangstyp 3 – Betriebskonzept je nach Datenverbund

	<b>Fall 1: Starker (öffentlicher) Datenverbund</b>	<b>Fall 2: Lösung auf Ebene Fahrzeuge/Hersteller</b>
Konzept	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrzeug übermittelt dauernd Position und Fahrmodus (Fahrer/in oder AF)</li> <li>Digitale Betriebswechsellpunkte (bspw. Start zusätzlicher Fahrstreifen) werden an Fahrzeuge gesendet.</li> <li>Betreiber stellt Informationen zum Betrieb der Fahrstreifen im Datenverbund zur Verfügung (bspw. schnelle Reaktion auf Vorhandensein Pannenfahrzeug → wieder Mischverkehr)</li> <li>Fahrzeug gibt geplante Route an</li> <li>System gibt Empfehlung, ob Nutzung des zusätzlichen FS sinnvoll ist (aufgrund der Fahrlänge auf der HLS)</li> <li>Trajektorien aller vernetzten Fahrzeuge werden ausgetauscht</li> <li>Umsetzung Fahrverbot konventionelle Fahrzeuge auf zusätzlichem FS über Signalisation, Kontrolle über Fahrmodusinformation der AF</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betrieb der Fahrstreifen wird durch Signale/Markierungen durch Fahrzeuge erkannt (bspw. LED-Anzeigen auf dem Boden oder überkopf, mehr Ausstattung nötig)</li> <li>Trajektorien der Fahrzeuge werden ausgetauscht, sofern diese V2V- vernetzt sind</li> <li>Umsetzung Fahrverbot konventionelle Fahrzeuge auf zusätzlichem FS über Signalisation (richtet sich nicht an AF) und direkte Fahrzeugkontrollen</li> </ul>
Obj. Verkehrs-sicherheit	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>
Subj. Verkehrs-sicherheit	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>
Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit	<b>++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)</b>	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>

### Bewertung der Konzepte

Im Folgenden werden die Auswirkungen des beschriebenen Konzepts auf die objektive und subjektive Verkehrssicherheit sowie Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit beschrieben. Bei der Bewertung werden wo nötig die beiden in Tab. 11 beschriebenen Fälle unterschieden.

- **Objektive Verkehrssicherheit:** Da der zusätzliche Fahrstreifen ausschliesslich durch automatisierte Fahrzeuge genutzt wird, werden menschliche Unfallursachen auf dem zusätzlichen Fahrstreifen verhindert. Zusätzliche Unfälle durch widerrechtlich auf dem zusätzlichen Fahrstreifen fahrende konventionelle Fahrzeuge sind sehr unwahrscheinlich.
- **Subjektive Verkehrssicherheit:** Die subjektive Sicherheit nimmt insbesondere deshalb zu, weil die Fahraufgabe an das Fahrzeug übergeben und dadurch auch das Bedürfnis nach Kontrollierbarkeit kleiner wird. Allerdings ist der Fahrstreifen nicht baulich abgetrennt, sodass auch konventionelle Fahrzeuge auf den zusätzlichen Fahrstreifen wechseln könnten. Die subjektive Sicherheit wird als hoch eingestuft und auch die objektive Sicherheit wird hoch sein. Die subjektive Sicherheit wird deshalb im Vergleich zum Ist-Zustand als angemessener beurteilt.
- **Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit:** Der zusätzliche Fahrstreifen weist aufgrund der niedrigeren Zeitlücken und der homogeneren Geschwindigkeit eine deutlich erhöhte Kapazität auf. Diese Vorteile kommen insbesondere in Fall 1 zum Tragen, wo aufgrund

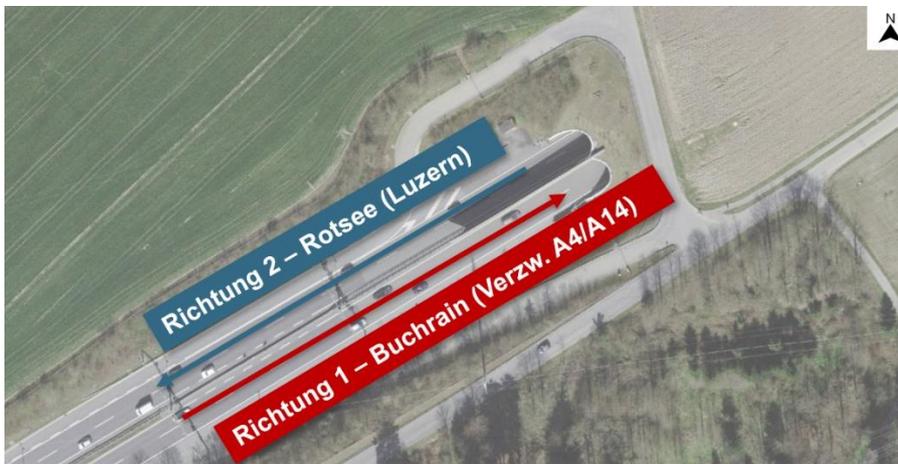
der umfangreichen Vernetzung durchgehend niedrigere Zeitlücken erreicht werden können.

## 6.5 Übergangstyp 4: Wechsel des Verkehrszustandes

Bei diesem Übergangstyp erfolgt ein Wechsel des Verkehrszustands von einem freien Verkehrsfluss zum Kapazitätsbereich. Dies bedeutet, dass automatisierte Fahrzeuge, die zuvor manuell gesteuert wurden, die AF aktivieren, um die Kapazität entlang des Autobahnabschnitts zu erhöhen.

### 6.5.1 Ausgangslage

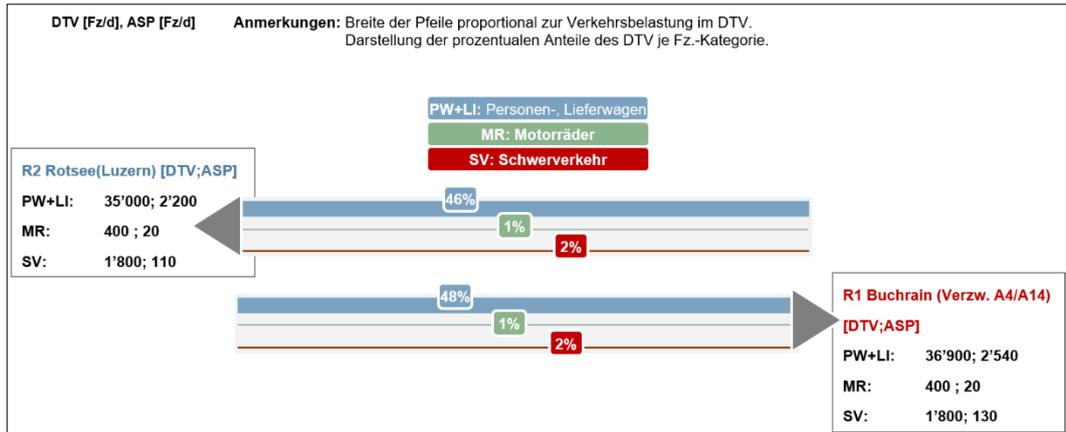
Als Beispielabschnitt für den Übergangstyp 4 wurde der Abschnitt "Buchrain – Rotsee" auf der N14 aufgrund häufig auftretender Stausituationen ausgewählt (siehe Abb. 59). Um den "Wechsel des Verkehrszustands" zu analysieren, wurden Detektorzählungen auf der Autobahnstrecke Richtung Buchrain bzw. Verzweigung A4/A14 (rot gekennzeichnet) sowie auf der Autobahnstrecke Richtung Rotsee/Luzern (blau gekennzeichnet) betrachtet.



**Abb. 59** Beispiel Übergangstyp 4: "Buchrain – Rotsee", eigene Darstellung

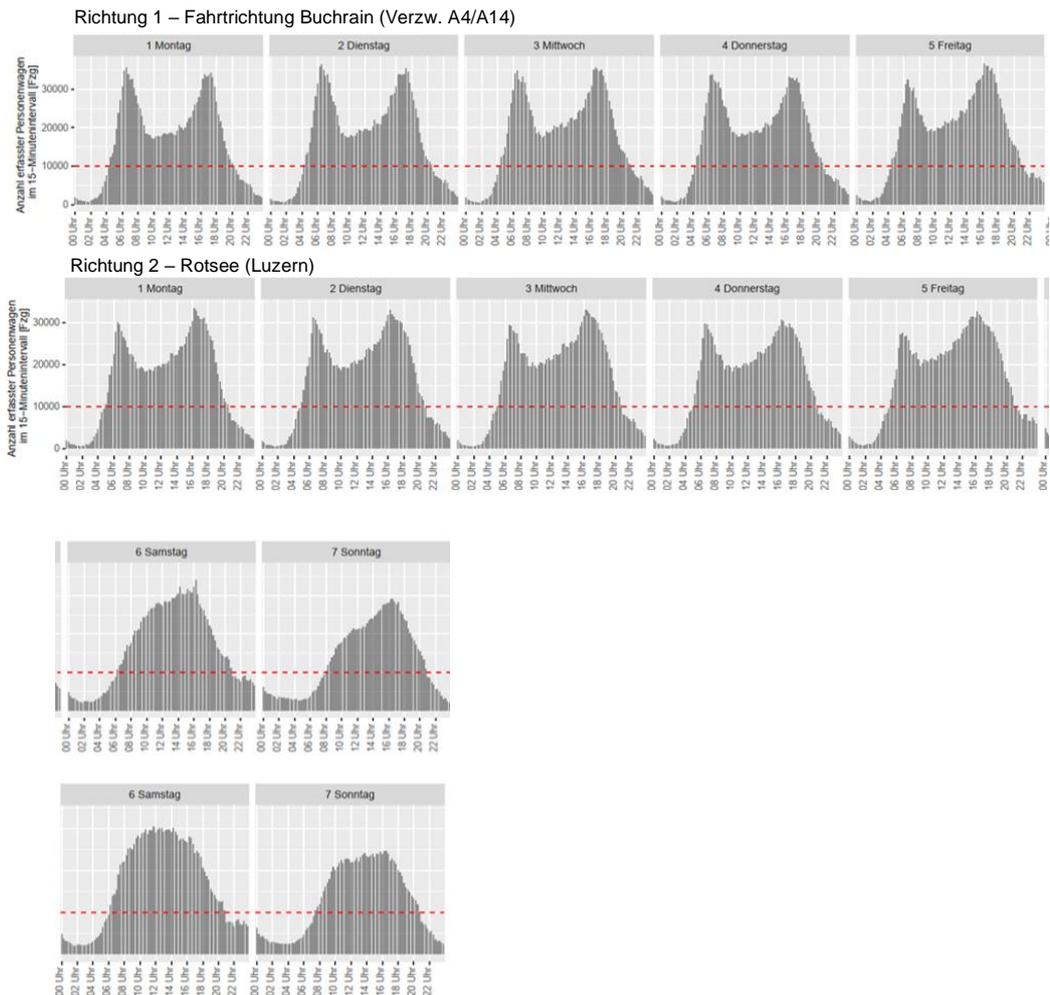
#### Verkehrsnachfrage

Der Abschnitt "Buchrain – Rotsee" verzeichnet täglich etwa 36'900 Personen- und Lieferfahrzeuge in Richtung Buchrain und 35'000 Fahrzeuge in Richtung Rotsee (siehe Abb. 60). Demnach ist die Verkehrsbelastung in beiden Fahrrichtungen tagsüber in etwa gleich hoch. Auch in der Abendspitze zeigt sich eine nahezu ausgeglichene Verteilung der Fahrzeuge auf die beiden Fahrrichtungen, wobei die Verkehrsbelastung in Richtung Buchrain geringfügig höher liegt.



**Abb. 60** Beispiel Übergangstyp 4 - Verkehrsbelastung DTV [Fz/d], ASP [Fz/h] Fahrtrichtung Buchrain und Rotsee, eigene Darstellung

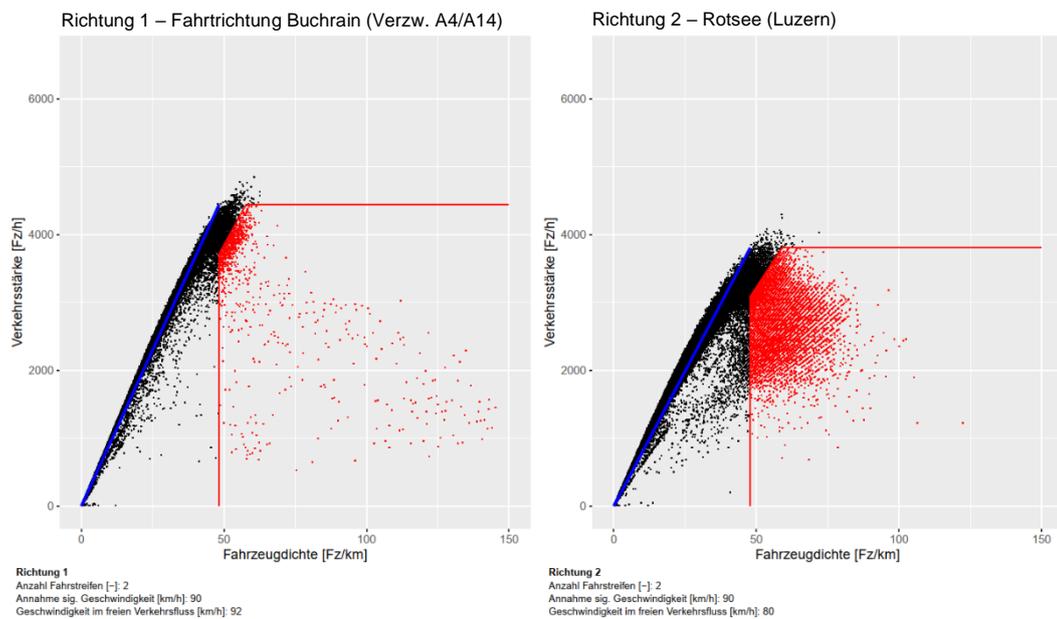
Dies lässt sich auch bei Betrachtung der Tagesganglinien auf Basis der PW-Fahrzeuge pro Tag im 15-Minuten-Intervall in Fahrtrichtung Buchrain und Rotsee bestätigen: Die werktäglichen Morgen- und Abendspitzen sind in beiden Richtungen in etwa ähnlich hoch ausgeprägt. Im Allgemeinen weisen beide Richtungen zu Spitzenstunden sehr hohe Verkehrsbelastungen auf. Auch am Wochenende treten ähnlich hohe Verkehrsbelastungen auf.



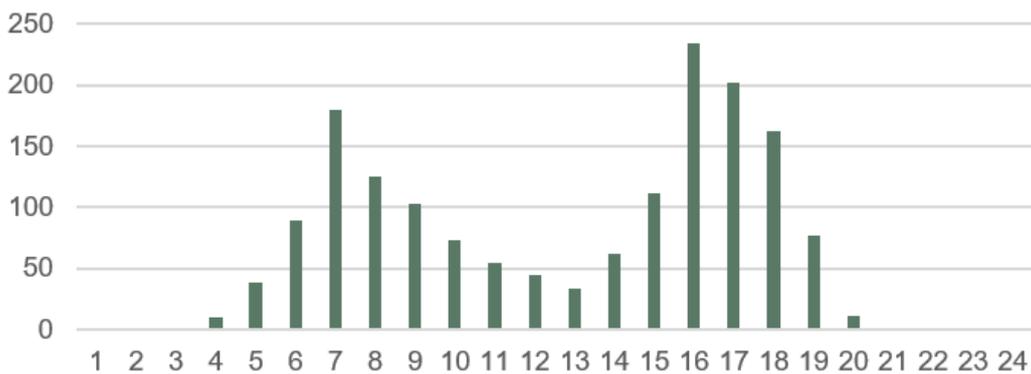
**Abb. 61** Beispiel Übergangstyp 4 – Tagesganglinien im DTV [Fz/d], eigene Darstellung

## Verkehrszustand

Von insgesamt 95'906 bewerteten Zeitintervallen in Fahrtrichtung Buchrain können lediglich 0.1% dem instabilen Zustand zugeordnet werden (vgl. Abb. 62). Für die Fahrtrichtung Rotsee/Luzern können von insgesamt 95'891 bewerteten Zeitintervallen 10.4% dem instabilen Zustand zugeordnet werden. Demnach kommt es trotz ähnlicher Verkehrsbelastungen insbesondere in Fahrtrichtung Luzern zu mehr instabilen Zuständen. Eine detailliertere Untersuchung der instabilen Zustände in Fahrtrichtung Luzern zeigt, dass ein Wechsel zwischen einem stabilen und instabilen Zustand in 3% der betrachteten Zeitintervalle stattfindet und vorwiegend während der Morgen- und Abendspitze auftritt (vgl. Abb. 63).



**Abb. 62** Beispiel Übergangstyp 3 – Fundamentaldiagramm zum Verkehrszustand für Fahrtrichtung Buchrain und Rotsee, eigene Darstellung



**Abb. 63** Beispiel Übergangstyp 4 – Anzahl Zustandswechsel im Tagesverlauf in Fahrtrichtung Rotsee (Luzern), eigene Darstellung

## Konstanz der Geschwindigkeit

Der hohe Anteil an instabilen Verkehrszuständen bestätigt auch die Betrachtung der mittleren Geschwindigkeit. Eine täglich starke Abweichung der Zielstreuung ist nur in Fahrtrichtung Luzern zu beobachten. Sowohl in der werktäglichen Morgen- und Abendspitze sowie am Wochenende treten hohe Abweichungen der mittleren Geschwindigkeiten auf (siehe Abb. 64). In Fahrtrichtung Buchrain sind keine Überschreitungen der Zielstreuung identifizierbar, weil dort deutlich weniger instabile Verkehrszustände auftreten.

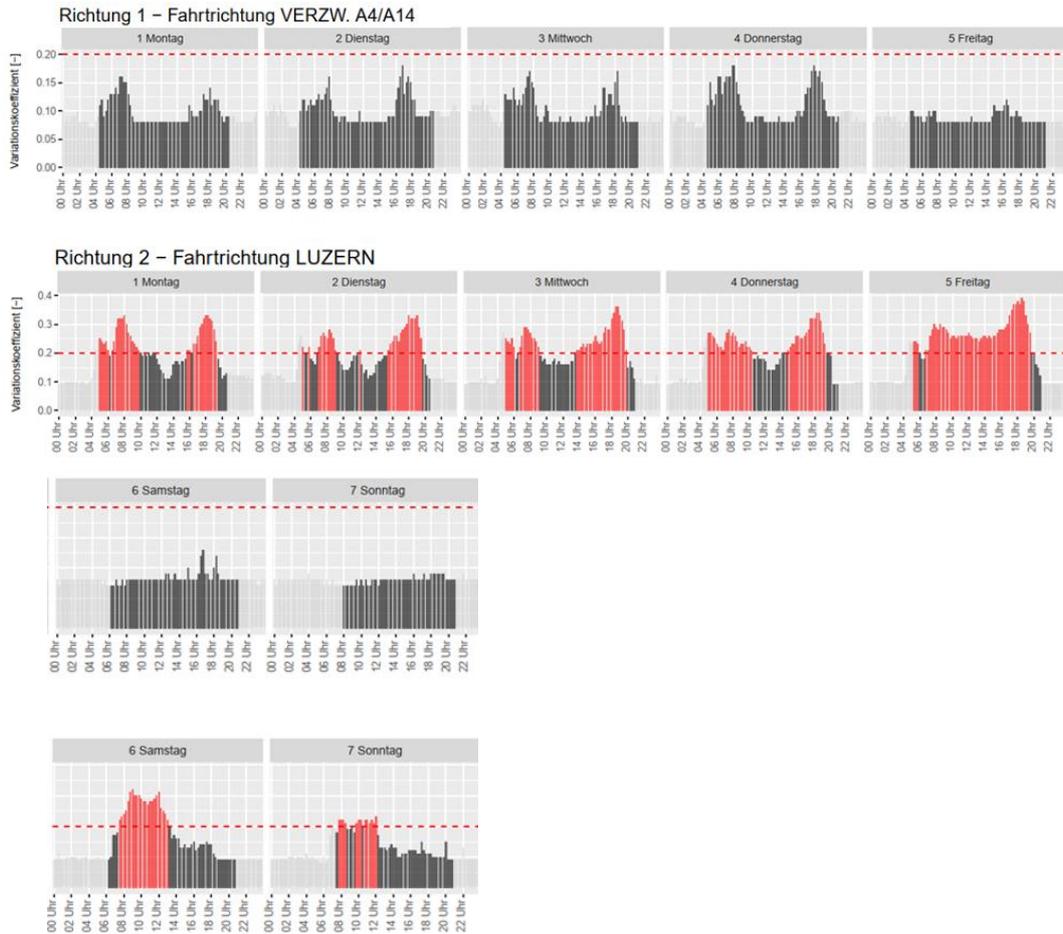


Abb. 64 Beispiel Übergangstyp 3 – Konstanz der Geschwindigkeit, eigene Darstellung

**Folgezeitlücken**

Die sicherheitsbedingten minimalen Folgezeitlücken werden bei konventionellen Fahrzeugen auf allen Fahrstreifen sowohl in Richtung Buchrain als auch in Richtung Rotsee unterschritten. Die Unterschreitungen variieren je nach Fahrstreifen und Fahrzeugkategorie zwischen 25 – 60% (bei Betrachtung mit <1.8 Sekunden). Bei der Fahrtrichtung Buchrain treten tiefe Zeitlücken tendenziell eher auf dem 1. Überholstreifen auf. In Richtung Rotsee/Luzern sind kaum Unterschiede zwischen den Fahrstreifen erkennbar. Eine Begründung dafür sind u.a. die grösseren Abweichungen der Zielstreuung in Fahrtrichtung Rotsee. Aufgrund der hohen Verkehrsbelastungen kommt es hier öfter zu instabilen Zuständen bzw. Stausituationen, die zu geringen Folgezeitlücken führen können. In beiden Richtungen weisen Motorradfahrende tendenziell einen höheren Anteil an tiefen Folgezeitlücken auf. Die Sensitivitätsanalyse beider Fahrtrichtungen bestätigt diese Beobachtung.

Tab. 12 Beispiel Übergangstyp 4 – Unterschreitung des Mindestabstands in %

Richtung Buchrain	Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	18'300	16'700
	MR	200	200
	SV	1'200	600
Unterschreitung Mindestabstand (<1.8s) in %	PW+LI	38%	60%
	MR	52%	57%
	SV	25%	57%
Unterschreitung Mindestabstand (<0.9s) in %	PW+LI:	8%	26%
	MR:	20%	29%
	SV:	4%	26%

Richtung Rotsee	Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	18'800	18'100
	MR	200	200
	SV	1'700	100
Unterschreitung Mindestabstand (<1.8s) in %	PW+LI	48%	46%
	MR	56%	57%
	SV	24%	21%
Unterschreitung Mindestabstand (<0.9s) in %	PW+LI:	11%	11%
	MR:	23%	25%
	SV:	5%	5%

### Gefahrenere Geschwindigkeiten

Die zugelassene Geschwindigkeit wird bei beiden Fahrtrichtungen kaum überschritten. Die Überschreitungen (>125 km/h) variieren je nach Fahrstreifen und Fahrzeugkategorie lediglich zwischen 0 – 2%.

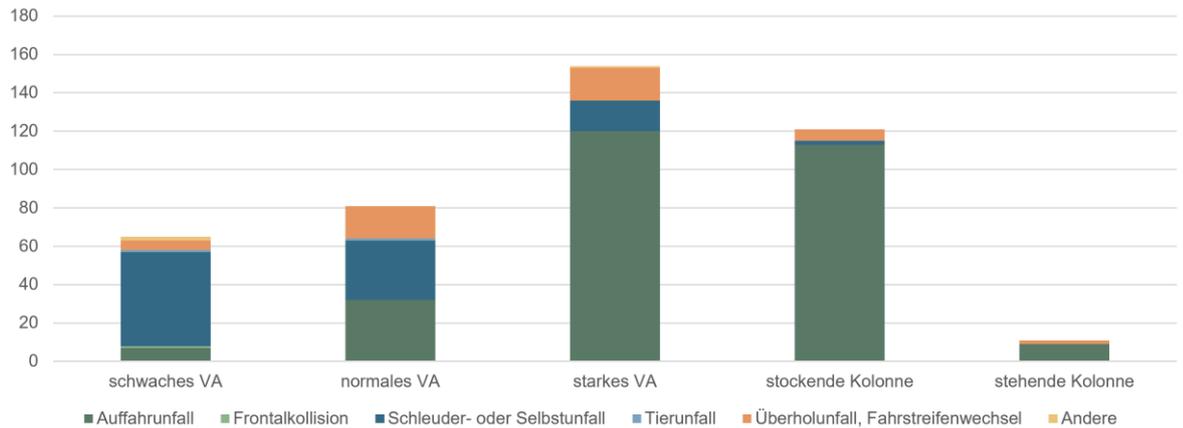
**Tab. 13** Beispiel Übergangstyp 4 – Überschreitung Geschwindigkeit in %

Richtung Buchrain	Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	18'300	16'700
	MR	200	200
	SV	1'200	600
Überschreitung Geschwindigkeit (>125 km/h) in %	PW+LI	0%	0%
	MR	1%	2%
	SV	0%	k.A. (Wert unplausibel)
Richtung Rotsee	Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	18'300	16'700
	MR	200	200
	SV	1'200	600
Überschreitung Geschwindigkeit (>125 km/h) in %	PW+LI	0%	0%
	MR	0%	0%
	SV	0%	0%

### Objektive Verkehrssicherheit

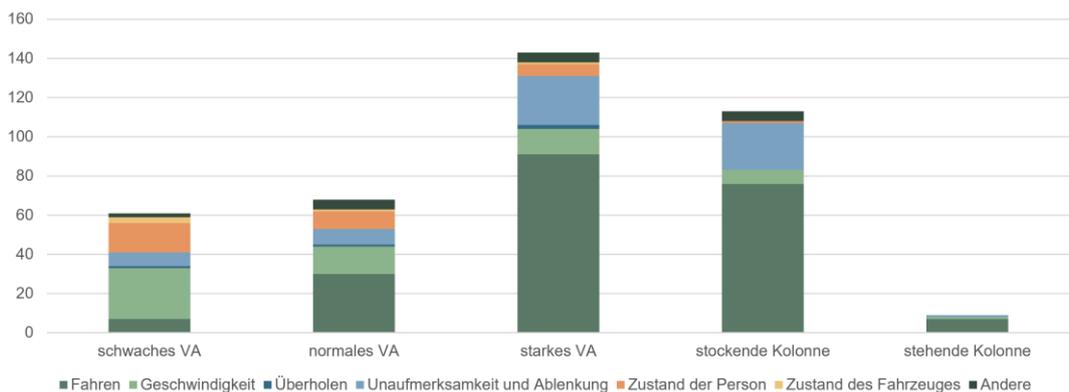
Die Analyse der Verkehrsunfälle umfasst die Autobahn im Bereich der Koordinaten 2'665'160 E – 2'668'965 E und 1'213'430 N – 1'217'470 N und damit den Bereich der Nationalstrasse N14 zwischen den Anschlüssen Buchrain und Rotsee. Der Abschnitt umfasst ca. 5.5 km. Von den 432 Unfällen werden die Unfälle, welche durch PW oder LI verursacht wurden, näher untersucht. Im Folgenden werden 394 Unfälle mit 310 leicht Verletzten, einem erheblich Verletzten und einem Todesopfer analysiert.

Das Verkehrsaufkommen wird im Unfallaufnahmeprotokoll der Polizei festgehalten. Die Optionen sind: schwaches Verkehrsaufkommen (VA), normales VA, starkes VA, stockende Kolonne und stehende Kolonne. Die meisten Unfälle werden bei starkem VA (36%) und bei stockender Kolonne (28%) verursacht. In beiden Kategorien dominiert als Unfalltyp die Auffahrkollision deutlich (siehe Abb. 65).



**Abb. 65 Unfalltypengruppen bei unterschiedlichem Verkehrsaufkommen (VA).**

Die Hauptunfallursachengruppen sind Ursachen, die mit dem Fahren in Zusammenhang stehen, grossmehrheitlich (80%) wird zu nahes Aufschliessen als Unfallursache in dieser Unfallursachengruppe festgestellt. Während bei schwachem VA auch die nicht angepasste Geschwindigkeit zu Unfällen führt, nimmt der Anteil dieser Unfallursache bei starkem VA und stockender Kolonne erwartungsgemäss ab. Bei starkem VA und stockender Kolonne führen Unaufmerksamkeit und Ablenkung am zweithäufigsten zu Unfällen.



**Abb. 66 Hauptunfallursachengruppen bei unterschiedlichem Verkehrsaufkommen.**

### Subjektive Verkehrssicherheit

Die Geschwindigkeit von 125 km/h wird in diesem Abschnitt im Beobachtungszeitraum nicht überschritten, was zu einem hohen subjektiven Sicherheitsgefühls (Folgenschwere) führt. Die Streuung der Geschwindigkeit ist andererseits hoch, was eher einen negativen Effekt hat. In fast der Hälfte der Fälle werden die 1.8 s Abstand unterschritten und in 11% wird sogar 0.9 s Abstand unterschritten. Das nahe Aufschliessen hat einen negativen Effekt auf die subjektive Sicherheit des Vorausfahrenden Fahrzeugs (Kontrollierbarkeit).

### Fazit zur Analyse

Die Analyse der aktuellen Situation des Beispielabschnitts für den Übergangstyp "Wechsel des Verkehrszustands" liefert eine erste Einschätzung hinsichtlich des Auftretens von Übergängen und ihrer Konzeptionierung. Bei der Planung ist es unerlässlich, die instabilen Zustände (in diesem Fall 10.4% in Fahrtrichtung Rotsee) und ihre Zeitpunkte im Tages- und Wochenverlauf angemessen zu berücksichtigen. Angesichts der Unterschreitung von Folgezeitlücken entsteht die Notwendigkeit, das (menschliche) Verhalten in der Umgebung zu analysieren, um sichere Übergänge vom automatisierten in den konventionellen Fahrbetrieb zu gewährleisten. Eine geringe Überschreitung der Geschwindigkeit stellt hinzu ein weiteres Indiz für die Gestaltung dar. Die Analyse der Unfälle zeigt insbesondere das grosse Potential, welches das automatisierte Fahren für die Sicherheit bei starkem

Verkehrsaufkommen und stockendem Verkehr hat. Auffahrkollisionen aufgrund von zu nahem Aufschliessen können dank Technik verhindert werden.

## 6.5.2 Mögliche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb

Der Übergang vom Mischverkehr zu automatisierter Steuerung ist erwartbar, aber temporär. Es wird erwartet, dass der Fahrer/die Fahrerin die Steuerung abgibt und dafür Anreize erhält, beispielsweise durch direkte Bonuspunkte bei der Fahrzeugzulassungsstelle oder durch Vorteile beim Kauf eines Fahrzeugs, mit dem man sich für eine Abgabe der Steuerung in kritischen Bereichen verbindlich einverstanden erklärt (auch in einem jährlichen Abo-Modell denkbar). Die Steuerungsabgabe kann innerhalb von Sekundenbruchteilen erfolgen, sofern die Randbedingungen wie Geschwindigkeit oder Folgezeitlücken eingehalten sind.

Eine wesentliche Voraussetzung zur Anwendung sind hochaufgelöste Daten zu Zonen mit kritischem Verkehrszustand wie etwa das Erreichen eines definierten Geschwindigkeitsgrenzwerts. Etwa 10 Sekunden vor dem Einfahren in den kritischen Bereich erfolgt eine Empfehlung an den Fahrer/die Fahrerin zur Übergabe der Fahrzeugsteuerung an das System. Nicht-automatisierte Fahrzeuge müssen während der Übergabe beobachtet und ihr Verhalten prognostiziert werden.

Folgende Abb. 67 illustriert das mögliche Konzept.

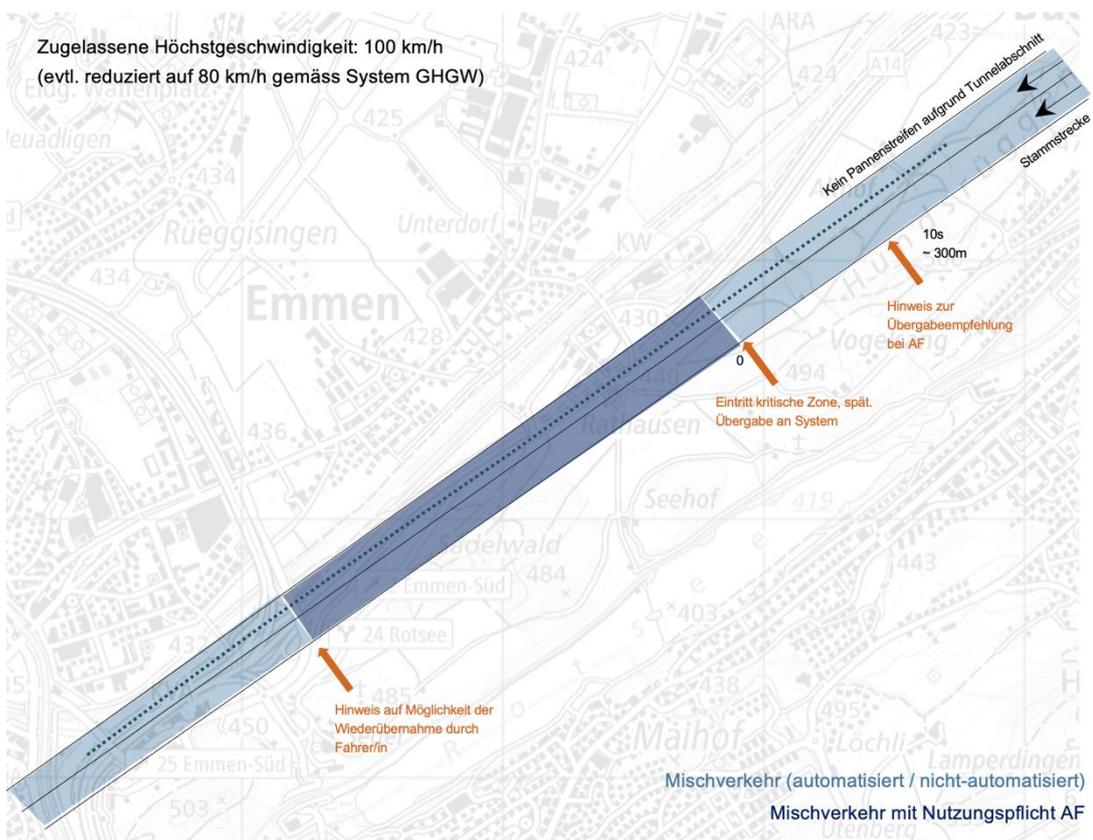


Abb. 67 Übergangstyp 4: Konzept zu Gestaltung und Betrieb, eigene Darstellung

**Tab. 14** Übergangstyp 4 – Betriebskonzept je nach Datenverbund

	<b>Fall 1: Starker (öffentlicher) Datenverbund</b>	<b>Fall 2: Lösung auf Ebene Fahrzeuge/Hersteller</b>
Konzept Wechsel Verkehrszustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrzeug übermittelt dauernd Position und Fahrmodus (Fahrer/in oder AF)</li> <li>• Betreiber definiert kritische Zonen anhand hochaufgelöster Verkehrszustandsdaten verschiedener Quellen</li> <li>• Temporäre digitale Betriebswechsellpunkte (bspw. Start Übergangsbereich) werden an Fahrzeuge gesendet.</li> <li>• Betreiber gibt Anreize für Steuerungsabgabe an System an und verbucht diese nach Übergang</li> <li>• Trajektorien aller vernetzten Fahrzeuge werden ausgetauscht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betreiber definiert kritische Zonen anhand Verkehrszustandsdaten der verfügbaren Quellen und signalisiert diese lokal (temporäre Anzeigen, mehr Ausstattung nötig)</li> <li>• Betriebswechsellpunkte werden durch Signale/Markierungen durch Fahrzeuge erkannt</li> <li>• System leitet Übergabeempfehlung an Fahrer/in weiter (evtl. auch opt-out, Vorgabe an Hersteller in Zulassungsverfahren)</li> <li>• Anreize in diesem Modell besser über Fahrzeugkauf (Förderung von Fahrzeugen mit gewünschter Verhaltensanpassung)</li> <li>• Trajektorien der Fahrzeuge werden ausgetauscht, sofern diese V2V- vernetzt sind</li> </ul>
Obj. Verkehrs-sicherheit	<b>++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)</b>	<b>++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)</b>
Subj. Verkehrs-sicherheit	<b>0 (ggü. heutiger Situation keine oder gegenläufige Effekte)</b>	<b>0 (ggü. heutiger Situation keine oder gegenläufige Effekte)</b>
Verkehrs-kapazität und Zuverlässigkeit	<b>++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)</b>	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>

### Bewertung der Konzepte

Im Folgenden werden die Auswirkungen des beschriebenen Konzepts auf objektive und subjektive Verkehrssicherheit sowie Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit beschrieben. Bei der Bewertung werden wo nötig die beiden in Tab. 14 beschriebenen Fälle unterschieden.

- Objektive Verkehrssicherheit: Die Anzahl der Unfälle kann deutlich reduziert werden, da durch die automatisierten Fahrfunktionen Auffahrkollisionen (häufigste Unfallursache im Störfall) verhindert werden können.
- Subjektive Verkehrssicherheit: Es werden keine Effekte erwartet, da Hochlastzustände in der Regel aufgrund von tiefen gefahrenen Geschwindigkeiten mit einer tiefen Folgeschwere verbunden werden.
- Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit: Durch verringerte Fahrzeugabstände und eine Homogenisierung des Verkehrsflusses im Störungsbereich sind erhöhte Kapazitäten zu erwarten, da automatisiertes Fahren in kritischen Zonen Vorteile aufweisen dürfte. Mit einem starken öffentlichen Datenverbund können diese kritischen Zonen durch die Verkehrsinfrastrukturbetreiber sehr genau und dynamisch definiert werden. Auch die direkte Incentivierung ist besser umsetzbar und erzeugt möglicherweise sogar eine erhöhte Übergaberate. Im Fall des Datenaustauschs auf Herstellerebene sind tendenziell an weniger Stellen Übergaben sichergestellt, da die Signalisierung ortsgelunden und nicht flächendeckend erfolgt.

## 6.6 Übergangstyp 5: Witterungswechsel auf "schlecht"

Beim letzten Übergangstyp ist die Deaktivierung der AF und der Wechsel auf die manuelle Steuerung im Fall von schwierigen Witterungsbedingungen vorgesehen. Dieser Wechsel erfolgt dynamisch und nicht planbar.

### 6.6.1 Ausgangslage

Als Beispielabschnitt für den Übergangstyp 5 wurde der Abschnitt "Sion-Est – Sierre-Ouest" auf der N9 aufgrund häufiger Witterungswechsel ausgewählt (siehe Abb. 68). Um den "Witterungswechsel auf schlecht" zu analysieren, wurden Detektorzählungen auf der Autobahnstrecke Richtung Sierre-Ouest (rot gekennzeichnet) sowie auf der Autobahnstrecke in Richtung Sion-Est (blau gekennzeichnet) betrachtet.



Abb. 68 Beispiel Übergangstyp 5: "Sion-Est – Sierre-Ouest", eigene Darstellung

#### Verkehrsnachfrage

Der Abschnitt "Sion-Est – Sierre-Ouest" verzeichnet täglich etwa 12'600 Personen- und Lieferfahrzeuge in Richtung Sierre-Ouest und 12'700 Fahrzeuge in Richtung Sion-Est (siehe Abb. 69). Demnach ist die Verkehrsbelastung in beiden Fahrtrichtungen tagsüber in etwa gleich hoch. Auch in der Abendspitze zeigt sich eine nahezu ausgeglichene Verteilung der Fahrzeuge auf die beiden Fahrtrichtungen, die Abendspitze ist in Fahrtrichtung Sion-Est um rund 100 Fahrzeuge ausgeprägter.

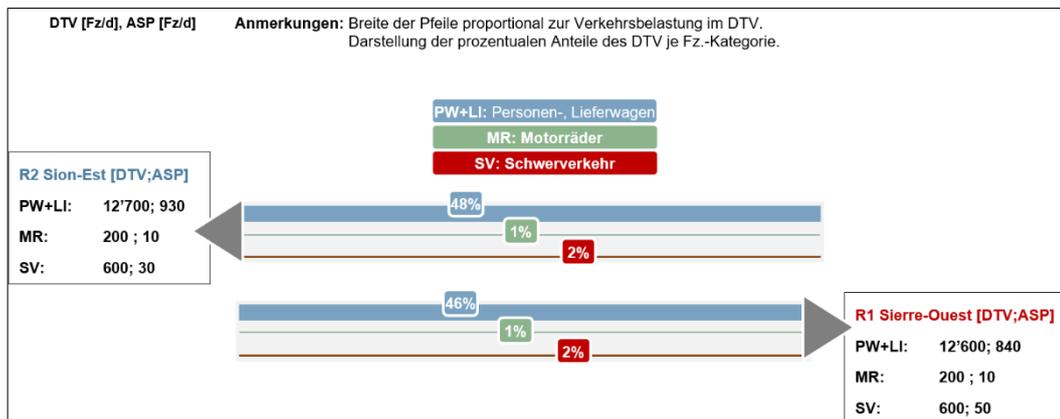


Abb. 69 Beispiel Übergangstyp 5 - Verkehrsbelastung DTV [Fz/d], ASP [Fz/h] Fahrtrichtung Sierre-Ouest und Sion-Est (Martigny), eigene Darstellung

Bei Betrachtung der Tagesganglinien auf Basis der PW-Fahrzeuge pro Tag im 15-Minuten-Intervall in Fahrtrichtung Sierre-Ouest und Sion-Est zeigt sich, dass bei Richtung Sierre-Ouest die werktägliche Abendspitze etwas höher ausgeprägt ist als die Morgenspitze. In Fahrtrichtung Sion-Est ist die werktägliche Morgen- und Abendspitze in etwa ähnlich hoch. Am Wochenende treten in beiden Richtungen im Vergleich niedrigere Verkehrsbelastungen auf.

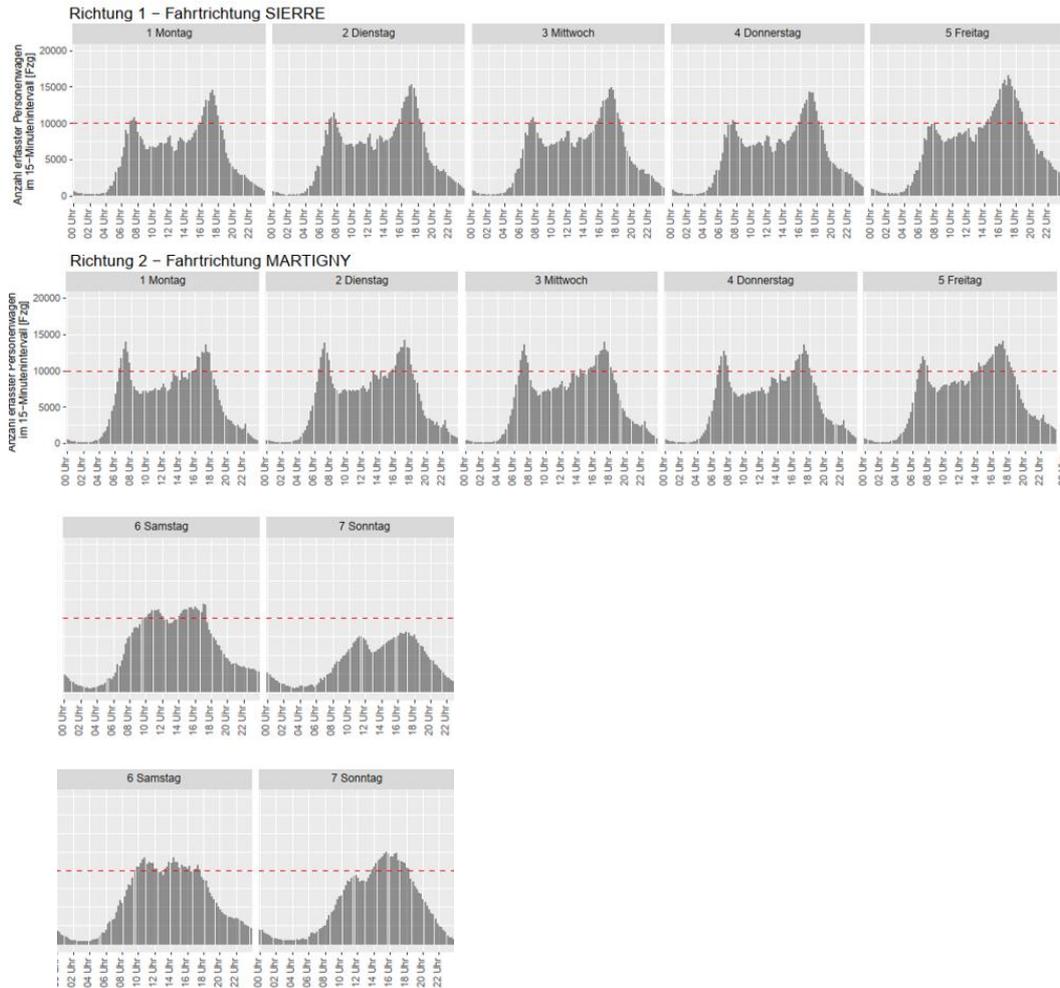


Abb. 70 Beispiel Übergangstyp 5 – Tagesganglinien im DTV [Fz/d], eigene Darstellung

**Verkehrszustand**

Bei insgesamt 103'243 bewerteten Zeitintervallen in Fahrtrichtung Sierre-Ouest treten keine instabilen Zustände auf (Abb. 71). Auch treten in Fahrtrichtung Sion-Est (Martigny) bei insgesamt 102'221 bewerteten Zeitintervallen kaum instabilen Zustände auf.

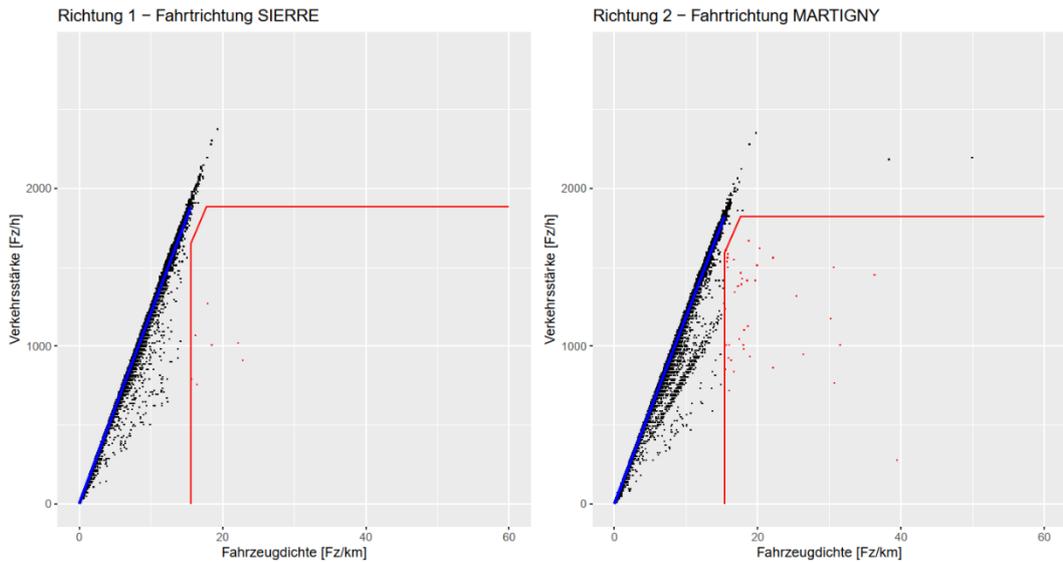
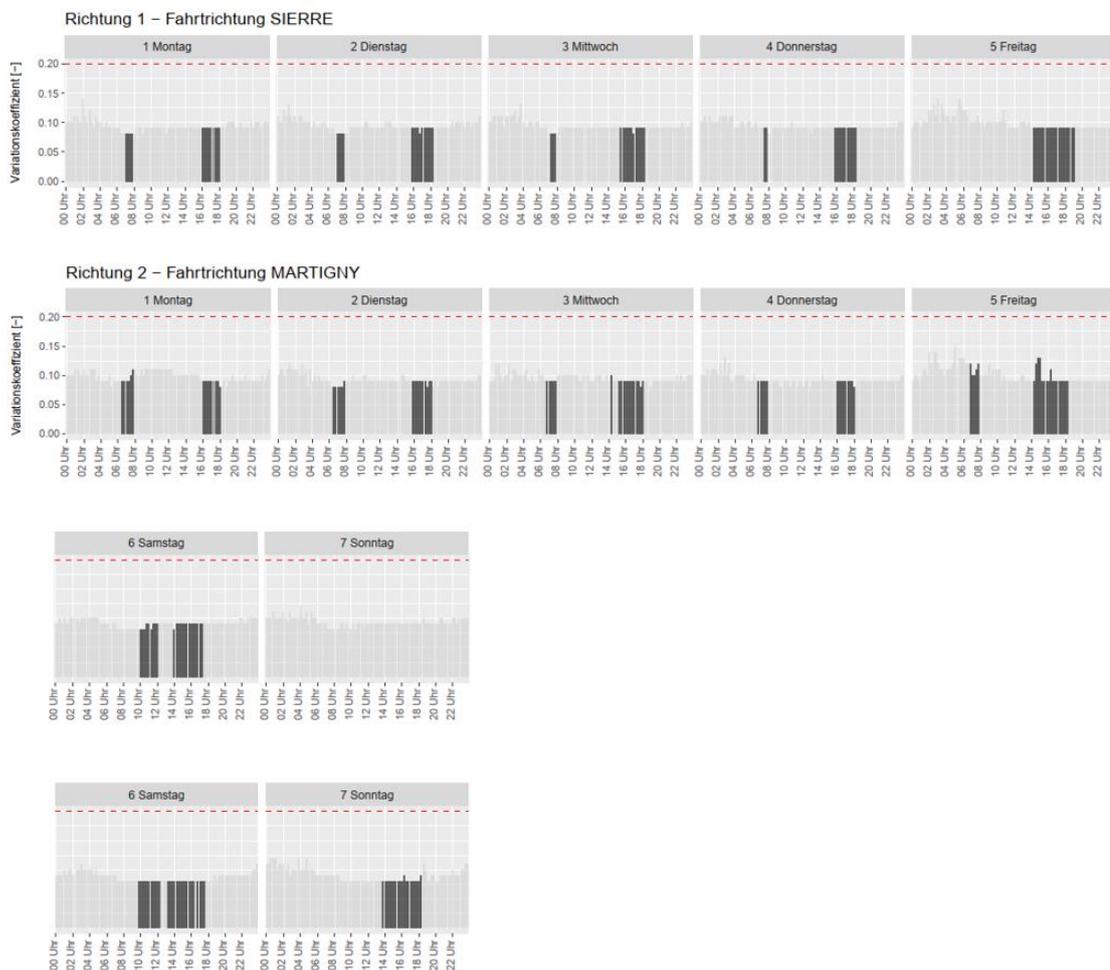


Abb. 71 Beispiel Übergangstyp 5 – Fundamentaldiagramm zum Verkehrszustand für Fahrtrichtung Sierre-Ouest und Sion-Est (Martigny), eigene Darstellung

## Konstanz der Geschwindigkeit

Dies bestätigt auch die Betrachtung der mittleren Geschwindigkeit. Eine Abweichung der Zielstreuung tritt bei beiden Richtungen sowohl Werktags als auch am Wochenende nicht auf (siehe Abb. 72).



**Abb. 72** Beispiel Übergangstyp 5 – Konstanz der Geschwindigkeit, eigene Darstellung

## Folgezeitlücken

Die sicherheitsbedingten minimalen Folgezeitlücken werden bei konventionellen Fahrzeugen auf allen Fahrstreifen sowohl in Richtung Sierre-Ouest als auch in Richtung Sion-Est unterschritten. Die Unterschreitungen variieren je nach Fahrstreifen und Fahrzeugkategorie zwischen 14 – 38% (bei Betrachtung mit <1.8 Sekunden). In beiden Richtungen weisen Motorradfahrende, insbesondere auf dem Normalstreifen einen höheren Anteil an tiefen Folgezeitlücken auf. Auf dem 1. Überholstreifen weisen alle Fahrzeugkategorien ähnlich hohe Unterschreitungen auf. Die Sensitivitätsanalyse beider Fahrrichtungen bestätigt diese Beobachtung.

**Tab. 15** Beispiel Übergangstyp 5 – Unterschreitung des Mindestabstands in %

Richtung Sierre-Ouest	Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	9'500	3'100
	MR	100	100
	SV	500	100
Unterschreitung Mindestabstand (<1.8s) in %	PW+LI	19%	25%
	MR	38%	18%
	SV	14%	22%
Unterschreitung Mindestabstand (<0.9s) in %	PW+LI:	5%	12%
	MR:	17%	10%
	SV:	3%	10%
Richtung Sion-Est	Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	10'000	2'700
	MR	100	100
	SV	500	100
Unterschreitung Mindestabstand (<1.8s) in %	PW+LI	22%	22%
	MR	37%	16%
	SV	14%	20%
Unterschreitung Mindestabstand (<0.9s) in %	PW+LI:	5%	10%
	MR:	16%	9%
	SV:	2%	9%

### Gefahrene Geschwindigkeiten

Die zugelassene Geschwindigkeit wird bei beiden Fahrtrichtungen teilweise stark überschritten. Die Überschreitungen (>125 km/h) variieren je nach Fahrstreifen und Fahrzeugkategorie zwischen 1 – 69%. In beiden Richtungen weisen vor allem Motorräder auf beiden Fahrstreifen erhöhte Geschwindigkeiten auf. Überschreitungen durch Personen- und Lieferwagen sowie Schwerverkehrsfahrzeugen sind vermehrt auf dem 1. Überholstreifen zu beobachten. Die hohe Überschreitung der Geschwindigkeit kann voraussichtlich auf die niedrigen Verkehrsbelastungen und die wenig gut besuchten Fahrbahnen zurückgeführt werden.

**Tab. 16** Beispiel Übergangstyp 5 – Überschreitung Geschwindigkeit in %

Richtung Sierre-Ouest	Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	9'500	3'100
	MR	100	100
	SV	500	100
Überschreitung Geschwindigkeit (>125 km/h) in %	PW+LI	27%	69%
	MR	39%	56%
	SV	k.A.	k.A. (Wert unplausibel)
Richtung Sion-Est	Fahrzeuge	Normalstreifen	1.Überholstreifen
Gesamt [Fz/Tag]	PW+LI	10'000	2'700
	MR	100	100
	SV	500	100
Überschreitung Geschwindigkeit (>125 km/h) in %	PW+LI	21%	53%
	MR	27%	38%
	SV	k.A.	k.A. (Wert unplausibel)

### Wetterereignisse

Um den Verkehrszustand bei einem Witterungswechsel auf "schlecht" zu analysieren, wurde zudem untersucht, wie sich der Verkehr auf dem Beispielabschnitt "Sierre-Ouest –

Sion-Est" ab einem Niederschlag von  $\geq 15$  l/qm verhält. Im Jahr 2019 ereignete sich lediglich am Freitag, 26. Juli 2019 zwischen 18:00 und 19:00 Uhr ein Wetterereignis mit einem derart hohen Niederschlag. Der Vergleich zwischen diesem einem Wetterereignis und dem durchschnittlichen Verkehrszustand (freitags, zwischen 18:00 und 19:00 Uhr) über das gesamte Jahr offenbarte folgende Erkenntnisse (siehe Tab. 17):

Es stellt sich heraus, dass es keine signifikanten Veränderungen im Verkehrszustand gibt. Dieser ist jeweils stabil geblieben. Auch die Verkehrsbelastung deutet auf keine Abweichungen im Vergleich zum durchschnittlichen Jahreswert hin. Es kann jedoch festgestellt werden, dass die mittlere Geschwindigkeit während des Wetterereignisses um etwa 10 km/h niedriger lag als der gemittelte Jahreswert.

Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass, obwohl der Verkehrszustand insgesamt stabil und die Verkehrsbelastung unverändert blieb, die Geschwindigkeit der Fahrzeuge bei schlechtem Wetter deutlich beeinflusst wurde. Dies könnte auf eine vorsichtigeren Fahrweise der Verkehrsteilnehmer/-innen während widriger Witterungsbedingungen hindeuten, um die Sicherheit auf der Strasse zu gewährleisten.

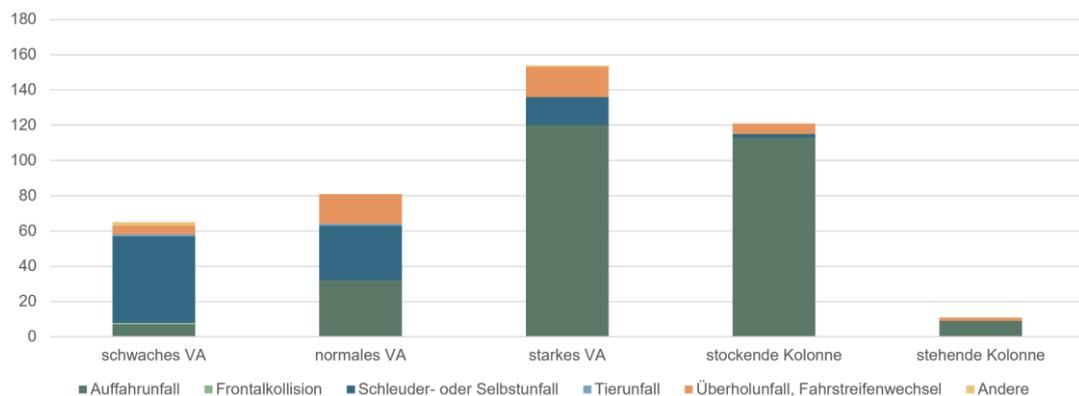
**Tab. 17** Beispiel Übergangstyp 5 – Wetterereignis (bei Niederschlag  $\geq 15$  l/qm)

Verkehrliche Wirkung	Richtung	Wetterereignis [Freitag, 26.07.2019, 18-19 Uhr]	Gemittelt über Jahr 2019 [Freitag, 18-19 Uhr]
Verkehrszustand	Richtung 1	stabil (100%)	stabil (100%)
	Richtung 2	stabil (100%)	stabil (100%)
Verkehrsbelastung	Richtung 1	$\emptyset$ 1'090 Fz/h	$\emptyset$ 1'150 Fz/h
	Richtung 2	$\emptyset$ 935 Fz/h	$\emptyset$ 916 Fz/h
Durchschnittliche Geschwindigkeit	Richtung 1	$\emptyset$ 112 km/h	$\emptyset$ 122 km/h
	Richtung 2	$\emptyset$ 107 km/h	$\emptyset$ 120 km/h

### Objektive Verkehrssicherheit

Die Analyse der Verkehrsunfälle umfasst die Autobahn im Bereich der Koordinaten: 2'595'580 E – 2'605'750 E und 1'120'000 N – 1'125'400 N und damit den Bereich der Nationalstrasse A9 zwischen den Anschlüssen Sion-Est und Sierre-Ouest. Der Abschnitt umfasst ca. 13 km. Im Perimeter wurden in den Jahren 2012-2021 80 Unfälle mit 32 Leichtverletzten, sechs erheblich Verletzten und zwei Todesopfern registriert. 71 Unfälle wurden von PW oder LI verursacht und werden im Folgenden analysiert.

Die Witterung wird im Unfallaufnahmeprotokoll der Polizei festgehalten. Die Optionen sind: schön, bedeckt, Regen, Schneefall, vereisender Regen, Hagel, andere. Zusätzlich kann angegeben werden, ob starker Wind oder Sichtbehinderung vorherrschten. Letztere Angaben sind jedoch nicht obligatorisch auszufüllen. Eine klare Auffälligkeit zeigt sich bei Schleuder- und Selbstunfällen. Diese geschehen zu 24% bei Regen. Bei den Auffahrkollisionen wurde lediglich ein Unfall bei Regen verursacht (siehe Abb. 73).



**Abb. 73** Unfälle nach Unfalltypengruppen und Witterung.

### Subjektive Verkehrssicherheit

Der Abschnitt Sion – Sierre zeichnet sich durch wenig Verkehr aus, was insbesondere in den Parametern Konstanz der Geschwindigkeit und Folgezeitlücken sichtbar wird. Sowohl die gleichmässige Geschwindigkeit als auch die ausreichenden Abstände haben einen positiven Einfluss auf die subjektive Verkehrssicherheit, weil die Situation für die Fahrer/-innen kontrollierbar ist und die Folgeschwere als kleiner eingestuft wird. Negativ auf die subjektive Sicherheit, insbesondere auf die erwartete Folgeschwere, wirkt sich die Tatsache aus, dass auf dem Überholstreifen 69% der Fahrzeuge schneller als 125 km/h fahren.

### Fazit zur Analyse

Die Analyse der aktuellen Situation des Beispielabschnitts für den Übergangstyp 5 liefert eine erste Einschätzung hinsichtlich des Auftretens von Übergängen und ihrer Konzeptionierung. Instabile Verkehrszustände sind praktisch nicht vorhanden. Angesichts der Unterschreitung von Folgezeitlücken und der Überschreitung von Geschwindigkeit entsteht die Notwendigkeit, das (menschliche) Verhalten in der Umgebung zu analysieren, um sichere Übergänge vom automatisierten in den konventionellen Fahrbetrieb zu gewährleisten. Die aufgezeigte Geschwindigkeitsreduktion bei widrigen Witterungsbedingungen stellt ebenfalls ein wichtiges Indiz für die Gestaltung dar.

Eine Auffälligkeit im Unfallgeschehen zeigt sich bei Schlechtwetter insofern, dass ein im Vergleich zu anderen Unfalltypengruppen grosser Anteil der Schleuder- und Selbstunfälle bei Regen verursacht wurde. Die Auswertung zeigt das Potential auf, Unfälle bei Regen, insbesondere bei Starkregen, dank Vernetzung oder automatisiertem Fahren zu verhindern.

## 6.6.2 Mögliche Konzepte zu Gestaltung und Betrieb

Der Übergang ist erforderlich, da ein (Teil-)Wegfall der Sensorik erfolgen könnte. Das Konzept sieht vor, dass etwa 40 Sekunden vor dem Erreichen der kritischen Zone die Übernahmeaufforderung an den Fahrer/die Fahrerin erfolgt und etwaige Nebenaktivitäten eingeschränkt werden (Stopp einer Filmwiedergabe, Aufrichten der Sitzposition etc.). Vor Einfahrt in die Schlechtwetterzone wird die Geschwindigkeit des Fahrzeugs stark reduziert (auf beispielsweise 40 km/h). Ohne eine Reaktion des Fahrers/der Fahrerin erfolgt 20 Sekunden vor Erreichen der kritischen Zone eine Warnung und der Hinweis, dass das Fahrzeug im Fall der Nichtübernahme abgestellt wird.

Auf Basis der Pannestreifenbelegung, die als Information an das Fahrzeug übermittelt wird, kann somit ein Fahrstreifenwechsel eingeleitet werden und die Geschwindigkeit so weit reduziert werden, dass die Abstellposition (bspw. Pannestreifen) erreicht wird (Rückfallebene). Abb. 74 verdeutlicht das Konzept.

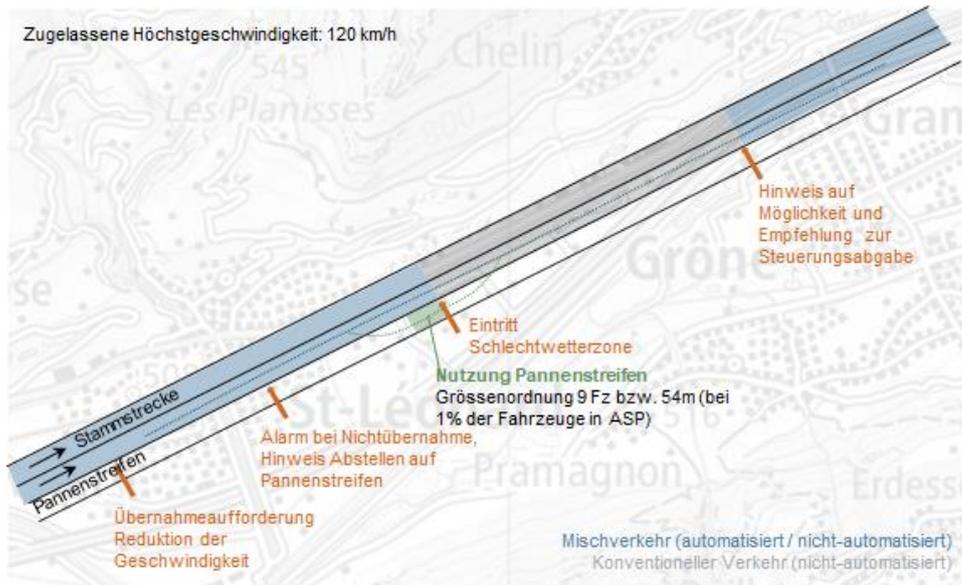


Abb. 74 Konzept Übergang 5 (eigene Darstellung)

Tab. 18 Übergangstyp 5 – Betriebskonzept je nach Datenverbund

	Fall 1: Starker (öffentlicher) Datenverbund	Fall 2: Lösung auf Ebene Fahrzeuge/Hersteller
Konzept Wechsel Verkehrszustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrzeug übermittelt dauernd Position und Fahrmodus (Fahrer/in oder AF)</li> <li>Betreiber definiert kritische Zonen anhand verschiedener hochauflöser Meteo-Daten</li> <li>Temporäre digitale Betriebswechsellpunkte (bspw. Start Übergangsbereich) werden an Fahrzeuge gesendet.</li> <li>"Befehl" zum Abstellen auf Pannestreifen wird übermittelt</li> <li>Pannestreifenangaben werden bereitgestellt</li> <li>Fahrzeug sendet Beginn und Abschluss Manöver risikominimaler Zustand</li> <li>Auslösung Rückfallebene</li> <li>Bestätigung Rückfallebene und Notfall durch System</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Austausch von Sensordaten V2V, Definition von Schlechtwetterzonen durch Fahrzeughersteller/System (Dilemma: Erstfahrzeug ist kritisch), evtl. werden (Regen-) Sensordaten auch von konv. Fahrzeugen genutzt</li> <li>Temporäre digitale Betriebswechsellpunkte (bspw. Start Übergangsbereich, Geschwindigkeitsreduktion) werden an Fahrzeuge gesendet</li> <li>System muss Manöver zum risikominimalen Zustand selbst einleiten können</li> <li>Pannestreifenangaben werden durch Erhebung und Austausch V2V bereitgestellt</li> <li>Pannestreifen müssen durch Fahrzeug erkannt oder durch Hersteller als Datensatz bereitgestellt werden</li> <li>Fahrzeug löst Rückfallebene durch Notfallebene aus</li> </ul>
Obj. Verkehrssicherheit	<b>++ (ggü. heutiger Situation deutliche Verbesserung)</b>	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>
Subj. Verkehrssicherheit	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>	<b>0 (ggü. heutiger Situation keine oder gegenläufige Effekte)</b>
Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit	<b>+ (ggü. heutiger Situation womöglich verbessert)</b>	<b>0 (ggü. heutiger Situation keine oder gegenläufige Effekte)</b>

### Bewertung der Konzepte

Analog zu den vorigen Konzepten fasst folgende Tab. 18 die Bewertung zusammen.

- Objektive Verkehrssicherheit: Eine häufige Unfallursache bei Regen ist das Nichtanpassen der Geschwindigkeit an die Witterungsbedingungen. Diese Unfälle kann

ein automatisiertes Fahrzeug verhindern, wenn entsprechende Daten zur Verfügung stehen und es dementsprechend gewarnt wird. Im Fall des öffentlichen Datenverbunds werden keine neuen Risiken erwartet. Im Fall des Datenaustauschs auf Herstellerebene kann im dichteren Verkehr ein neues Risiko sein, dass das erste Fahrzeug oder die ersten Fahrzeuge die Situation nicht frühzeitig erkennen können. Aus heutiger Sicht ist nicht klar, ob der Mensch oder die AF besser reagiert.

- Subjektive Verkehrssicherheit: Allenfalls fühlt man sich als Insasse sicherer, wenn man weiss, dass das Fahrzeug auf Basis von hochaufgelösten Meteodaten (Fall 1) bzw. von anderen Fahrzeugen (Fall 2) bzgl. Wetterrisiken gewarnt wird. Die Insassen vertrauen der Technik und das Bedürfnis nach Kontrollierbarkeit wird kleiner. Es wird erwartet, dass das subjektive Sicherheitsgefühl angemessener sein wird. In Fall 2 könnten allerdings Berichte zu Erstfahrzeugen in Schlechtwetterzonen, die verunfallt sind, das Vertrauen in die Technik senken.
- Verkehrskapazität und Zuverlässigkeit: Der Mensch übernimmt die Steuerung des Fahrzeugs wieder. Damit wird möglichen Sensorausfällen in der Schlechtwetterzone vorgebeugt und es werden verkehrsflusskritische Manöver in der Schlechtwetterzone verhindert. Im Fall des öffentlichen Datenverbunds werden gleichmässiger Geschwindigkeitsreduktionen erwartet, welche durch AF vorteilhaft sind. Bestenfalls stellt sich eine homogenere Geschwindigkeitsverteilung ein (dabei werden aber nur geringe Effekte erwartet, da auch konventionelle Fahrzeuge deutlich verzögern dürften). Ein Nachteil im Fall des Datenaustausches auf Herstellerebene könnte die möglicherweise dünne Datenlage bzgl. Schlechtwetterzonen sein, sodass die gleichmässiger Geschwindigkeitsreduktion durch AF nicht sichergestellt ist.

## 6.7 Verfügbarkeit von Pannestreifen auf dem Nationalstrassennetz

In den beschriebenen Konzepten zu den Übergängen vom Mischverkehr zum konventionellen Fahren (Übergangstyp 2 und 5) sind Pannestreifen eine Voraussetzung. In Bezug auf einen allfälligen Ausbaubedarf der Infrastrukturen stellt sich dabei die Frage, welcher Anteil des Nationalstrassennetzes heute mit Pannestreifen ausgestattet ist.

Hierzu wurde ein Datensatz der Fachapplikation Trasse (TRA) des ASTRA hinsichtlich der Verfügbarkeit von Pannestreifen ausgewertet. Die Fachapplikation Trasse dient der Verwaltung sowie der Auswertung der Daten zum Strassenraum und zur Unterstützung des Erhaltungsmanagements der Fahrbahn. Es sind alle Nationalstrassen im Ist-Zustand erfasst. Folgende Attribute wurden aus TRA ausgewertet:

- Streckenlänge von Anschluss-, Stamm- und Zubringerachsen (ohne Rampenachsen)
- Pannestreifen (PS): Pannestreifen von mind. 2.50m Breite
- Schmalere Seitenstreifen (SS): Seitenstreifen, der schmaler als 2.50m ist
- Trennstreifen (TS): Trennstreifen oder Insel auf der Fahrbahn (für den Verkehr gesperrte Flächen des Belags, Trennstreifen: schraffierte Flächen, Inseln: bauliche Massnahmen)

Eine einfache Unterscheidung zwischen Nationalstrassen 1./2./3. Klasse ist in TRA nicht direkt möglich, daher wurden alle Nationalstrassenachsen ausgewertet. Das Resultat der streckenbasierten Analyse ist:

**Tab. 19** Übersicht Streckenlänge und Pannestreifen der Nationalstrassen (aus TRA, ohne Berücksichtigung der Klassierung)

	Streckenlänge [km]	Anteil
Alle Strecken (Hin- und Rückrichtung)	4'071	100%
Pannestreifen (PS)	1'975	49%
Schmaler Seitenstreifen (SS)	270	7%
Trennstreifen (TS)	236	6%

In den aufgeführten Zahlen sind auch einige Abschnitte von Nationalstrassen 3. Klasse enthalten, die keinen HLS-Standard erfüllen. Gemäss Bundesamt für Statistik betrug die Gesamtlänge der „übrigen Nationalstrassen“, die nicht dem Typ „Autobahnen“ zugeordnet werden können, im Jahr 2023 710km. Diese Abschnitte sind als einfache Achsen in TRA erfasst, was stichprobenartig überprüft wurde. Werden die „übrigen“ Nationalstrassen bei der Gesamtlänge abgezogen, resultiert ein Gesamtnetz von rund 3'360km. Mit rund 1'980km Pannestreifen sind im Schnitt rund 59% der Strecken mit Pannestreifen ausgestattet. Würden auch die schmalen Seitenstreifen und die Trennstreifen (v.a. asphaltierte Flächen mit Schrägmarkierung) für risikominimale Zustände genutzt, wären bei 74% der Strecken Abstellflächen heute bereits vorhanden.

**Tab. 20** Übersicht Streckenlänge und Pannestreifen der Nationalstrassen (aus TRA, mit Abzug der übrigen Nationalstrassen)

	Streckenlänge [km]	Anteil
Alle Strecken (Hin- und Rückrichtung)	3'360	100%
Pannestreifen (PS)	1'975	59%
Schmaler Seitenstreifen (SS)	270	8%
Trennstreifen (TS)	236	7%

## 7 Erkenntnisse und Folgerungen für die Regulierung

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse festgehalten, die aus den gefundenen Übergangskonzepten abgeleitet werden können. In Bezug auf den Fall eines starken (öffentlichen) Datenverbunds werden die Anforderungen an die Datenübertragung festgehalten. Zudem wird der absehbare Anpassungsbedarf für die Regulierung, der aus den Konzepten hervorgeht, beschrieben.

### 7.1 Erkenntnisse aus den erarbeiteten Konzepten

Den in Kapitel 6 beschriebenen Konzepten zu Gestaltung und Betrieb der Übergänge des automatisierten Fahrens sind folgende Aspekte gemein:

- Alle gefundenen Konzepte weisen Betriebswechsellpunkte auf. Diese sind notwendig, um dem Fahrzeug bzw. dem System die Information zu geben, dass entweder vom automatisierten Betrieb auf das menschliche Steuern des Fahrzeuges umgestellt werden muss (unter Berücksichtigung der Übergangszeit) oder dass die Steuerung vom Menschen an das System abgegeben werden kann. Die Betriebswechsellpunkte sind örtlich festgelegt, jedoch unterscheidet sich je nach Übergangstyp die Zeitspanne (temporär oder permanent). Für die Übergänge im Zusammenhang mit Anschlüssen und der Fahrstreifensteuerung sind die Betriebswechsellpunkte permanent. Für die Übergänge infolge Schlechtwetter und Verkehrszuständen mit hoher Auslastung bestehen die Betriebswechsellpunkte nur temporär.
- Alle gefundenen Konzepte sind bzgl. Datenübertragung sowohl mit einem starken (öffentlichen) Datenverbund als auch mit einer Lösung mit Datenaustausch auf Ebene der Fahrzeuge/Hersteller kompatibel. Allerdings unterscheiden sich die technischen Anforderungen an die Betriebswechsellpunkte. Für den Fall eines starken (öffentlichen) Datenverbunds können die Betriebswechsellpunkte rein digital umgesetzt werden. Für den Fall eines Datenaustausch auf Ebene Fahrzeuge/Hersteller ist eine physische Ausgestaltung (bspw. Signalisation) notwendig, um eine vollständige Abdeckung sicherzustellen.
- Bei den Übergängen vom Mischverkehr zum konventionellen Verkehr ist in allen Konzepten ein Pannestreifen enthalten, der für das Erreichen des risikominimalen Zustandes notwendig ist. Darauf kann nicht verzichtet werden, wenn man auf die erarbeiteten Konzepte setzt. Rund 59% der HLS-Strecken des Nationalstrassennetzes dürften heute bereits einen Pannestreifen von mind. 2.50m Breite aufweisen, bei weiteren 15% sind schmale Seitenstreifen oder asphaltierte Trennstreifen vorhanden. Zudem braucht es für die Konzepte eine Rückfallebene (im Sinne eines Notrufs), der die Sicherheit für Menschen in automatisierten Fahrzeugen gewährleistet, die den risikominimalen Zustand erreichen.
- Bei den Übergängen vom Mischverkehr zum konventionellen Verkehr ist in allen Konzepten eine Reduktion der Geschwindigkeit für die automatisierten Fahrzeuge enthalten. Diese soll einerseits dazu dienen, den Anreiz zur Übernahme für die menschlichen Fahrer/innen zu erhöhen. Andererseits sollen Konflikte auf den Strassenabschnitten reduziert werden. Je nach Fall unterscheidet sich aber das Mass der Geschwindigkeitsreduktion.
- Bei den Übergängen vom Mischverkehr zum konventionellen Verkehr ist in allen Konzepten ein Wechsel der Sitzposition im Fahrzeug enthalten (bspw. Senkrechtstellen der Sitzlehne), der die Nebenaktivitäten im Fahrzeug einschränkt. Diese Massnahme scheint wichtig, um die Wahrscheinlichkeit einer Übernahme durch den Menschen zu erhöhen und die Notwendigkeit des Einleitens eines risikominimierenden Manövers, das zu potenziellen Konflikten führen kann, zu reduzieren.

## 7.2 Anforderungen an die Datenübertragung

Damit die gefundenen Konzepte zu den fünf Übergangstypen im Fall eines «starken (öffentlichen) Datenverbunds» funktionieren, müssen verschiedene Informationen zwischen dem einzelnen Fahrzeug und dem Datenverbund ausgetauscht werden. Tab. 2121 gibt die dafür notwendigen Daten wieder und ordnet diese nach der benötigten zeitlichen Auflösung ein. Fahrdynamische Daten, die für die Kooperation von Fahrzeugen notwendig sind, müssen in einer sehr hohen zeitlichen Auflösung ausgetauscht werden. Nur so können die Kooperation sichergestellt werden und Effizienzvorteile entstehen. Andere Daten wie der Betrieb von Fahrstreifen oder Betriebswechsellpunkte können mit einer geringeren zeitlichen Auflösung ausgetauscht werden. Für die Konzepte braucht es eine kontinuierliche Datenverfügbarkeit. Ausfälle der Datenübertragung können zu sicherheitskritischen Situationen führen und sind unbedingt zu vermeiden, insbesondere wenn Betriebswechsellpunkte nicht mehr übertragen werden und notwendige Übergänge nicht mehr eingeleitet werden können. Insgesamt gilt es zu berücksichtigen, dass die Liste nicht abschliessend ist. Für Übergänge, die über die betrachteten fünf Übergangstypen hinausgehen, können zusätzliche Daten notwendig werden.

**Tab. 21** Übersicht Datenübertragung für den Fall eines starken Datenverbunds

	Datenempfang (vom Verbund zum Fahrzeug)	Datenversand (vom Fahrzeug zum Verbund)
Daten mit einer hohen zeitlichen Auflösung (<1s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Position (Koordinaten) von anderen Fahrzeugen im Umfeld</li> <li>Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsänderung von anderen Fahrzeugen im Umfeld</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrzeugposition (Koordinaten)</li> <li>Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsänderung</li> </ul>
Daten mit einer tiefen zeitlichen Auflösung (ca. 1s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Digitale Betriebswechsellpunkte entlang Nationalstrassenachse (temporäre Punkte)</li> <li>Gültige Höchstgeschwindigkeit (v.a. bei Abschnitten mit variablen Höchstgeschwindigkeiten)</li> <li>Betrieb der unterschiedlichen Streifen (inkl. Pannestreifen und Fahrstreifen ausschliesslich für AF)</li> <li>Betriebsparameter Ramp Metering (zur Definition der optimalen Geschwindigkeit)</li> <li>Räumliche Ausdehnung Schlechtwetterzonen</li> <li>Räumliche Ausdehnung Staubereiche</li> <li>Gültige Incentives bei Übergabe der Fahrzeugsteuerung</li> <li>Empfehlung zur Nutzung von Fahrstreifen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrmodus (Fahrer/in oder System)</li> <li>Geplante Route</li> <li>Beginn und Abschluss eines Manövers zum risikominimalen Zustand</li> <li>Erreichen eines risikominimalen Zustandes</li> <li>Fahrzeugbelegung</li> </ul>
Zeitlich weitgehend konstante Daten (>10s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Digitale Betriebswechsellpunkte entlang Nationalstrassenachse (fixe Punkte)</li> <li>Räumliche Ausdehnung Pannestreifen</li> <li>Rauminformationen zu kritischen Zonen (potenzielle Staubereiche)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrzeugtyp</li> </ul>

Beim Datenmanagement ist des Weiteren zu beachten, dass über alle Fahrzeuge, Fahrzeughersteller, Betreiber des Datenverbunds und Länder einheitliche Standards und Qualitätsvorgaben umgesetzt sind. Zudem müssen die ausgetauschten Daten vor Cyberangriffen geschützt sein. Für weiterführende Handlungsempfehlungen wird auf das Teilprojekt 3 des ASTRA-Forschungspakets zum automatisierten Fahren [13] verwiesen.

## 7.3 Anpassungsbedarf Regulierung

Der Strassenverkehr in der Schweiz wird vor allem über folgende Rechtsinstrumente reguliert:

- Das Strassenverkehrsgesetz (SVG) [1] ordnet den Verkehr auf öffentlichen Strassen sowie die Haftung und die Versicherung für Schäden, die durch Motorfahrzeuge, Fahrräder oder fahrzeugähnliche Geräte verursacht werden. Gesetze werden durch die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft erlassen.
- Die das SVG ausführenden und konkretisierenden Verordnungen. Verordnungen werden durch den Bundesrat erlassen. Darunter insbesondere folgende Verordnungen:
  - Die Verkehrsregelnverordnung (VRV) [3].
  - Die Signalisationsverordnung (SSV) [4] regelt die Signale, Markierungen und Reklamen im Bereich von Strassen, die Zeichen und Weisungen der Polizei sowie die Verkehrsanordnungen und Verkehrsbeschränkungen. Verordnungen werden durch den Bundesrat erlassen.
  - Mit der neuen Verordnung über das automatisierte Fahren (AFV) [5] sollen die Zulassung und die Verwendung von Fahrzeugen mit einem Automatisierungssystem sowie die damit verbundenen Aspekte des Datenschutzes geregelt werden. Die AFV ist noch nicht rechtskräftig.

Der Bundesrat hat im Zusammenhang mit dem automatisierten Fahren die Teilrevision des SVG sowie die Neuarbeitung des AFV aufgegleist. Damit soll das automatisierte Fahren bis Anfang der 2030er-Jahre abgedeckt werden. Zur Teilrevision des SVG hat vom 12. August 2020 bis 12. Dezember 2020 die Vernehmlassung stattgefunden. In der Frühjahrssession 2023 hat das Parlament die Anpassungen am SVG beschlossen, welche nun gestaffelt in Kraft treten. Die Vernehmlassung zur AFV wurde am 18. Oktober 2023 eröffnet und läuft bis zum Februar 2024. Der Bundesrat plant, dass die AFV im Jahr 2025 in Kraft gesetzt wird. Danach erfolgen Teilrevisionen der Verordnung nach Bedarf. Die nächste SVG-Teilrevision ist ab 2029/30 geplant.

Aufgrund der Ausrichtung auf den Anfang der 2030er-Jahre stehen bei der aktuellen Teilrevision des SVG und der neuen AFV vier Anwendungsfälle im Fokus:

1. Befreiung der Fahrzeugführenden von den Pflichten hinsichtlich des dauernden Beherrschens des Fahrzeugs
2. Führerloses Parkieren ("Automated Valet Parking")
3. Führerlose Fahrzeuge ("Shuttles") auf bestimmten Strecken inkl. Operatoren
4. Führerlose Fahrzeuge mit geringen Dimensionen und niedrigen Geschwindigkeiten ohne Festlegung einer bestimmten Strecke (bspw. Lieferroboter)

Das vorliegende Forschungsvorhaben bezieht sich auf Nationalstrassen (v.a. HLS) und damit auf den Anwendungsfall 1. Die Regulierung zu den anderen Anwendungsfällen wird hier nicht erörtert.

Aus dem überarbeiteten Gesetzesentwurf zum teilrevidierten SVG gehen folgende grundlegende Bestimmungen hervor:

- Art. 25f reguliert die Anforderungen an einen Fahrmodusspeicher. Dieser hat verschiedene Ereignisse mit einem Zeitstempel aufzuzeichnen. Die Ereignisse werden im Artikel aufgeführt und betreffen u.a. die Aktivierung und Deaktivierung des Automatisierungssystems.
- Art. 25g reguliert den Datenzugriff beim Fahrmodusspeicher. Zugriff haben Fahrzeughalter, Unfalluntersuchungsbehörden und Fahrzeugführer/Operatoren, sofern diese ein berechtigtes Interesse haben.

Die Vernehmlassungsvorlage zum AFV enthält folgende wichtige Bestimmungen:

- Art. 3 enthält eine allgemeine Definition, was ein Automatisierungssystem können muss. Dazu gehört auch die Einleitung eines Manövers zur Risikominimierung. Der oder die Fahrzeugführer/in muss aber jederzeit bereit sein für die Übernahme der

Steuerung. Damit erlauben die Bestimmungen der AFV keine klare Zuordnung zu den SAE-Levels der Automatisierung.

- Art. 4 legt fest, dass der Hersteller den Einsatzbereich des Automatisierungssystems bestimmt. Die Zulassung unterliegt der Typengenehmigungspflicht. Dabei koordiniert das ASTRA die Konformitätsprüfung. Gemäss Art. 11 sind keine Ausnahmen von der Typengenehmigung mehr möglich.
- Art. 4 führt auf, welche Gegebenheiten Automatisierungssysteme erkennen können müssen. Dies sind meteorologische Rahmenbedingungen wie Niederschlag und Nebel, Tageszeit, Lichtintensität, Markierungen und Art der Verkehrsfläche sowie das geografische Gebiet. Diese Gegebenheiten werden nicht weiter spezifiziert bzw. technisch festlegt.
- Der Fahrmodusspeicher wird in Art. 7 ggü. dem SVG weiter konkretisiert, unter anderem zum Aufzeichnungsumfang (Art der Ereignisse, Zeitstempel in Sekundenauflösung, Positionsdaten). Bei Fahrstreifenwechseln muss 30s vor dem Manöver zur Risikominimierung bzw. 5s vor einer Systemübersteuerung durch Fahrzeugführer/in aufgezeichnet werden. Diese Zeitdefinition geht somit nicht in erster Linie auf die technischen Anforderungen der SAE-Levels der Automatisierung zurück, sondern gibt die Anforderungen zur Unfallprotokollierung wieder.
- Art. 14 legt fest, dass sicherheitskritische Vorfälle (mind. 1 Person verletzt, führerloses Fahrzeug mit erheblichem Sachschaden) dem ASTRA innerhalb von 14 Tagen gemeldet werden müssen.

Damit wird deutlich, dass der Fahrmodusspeicher in erster Linie so definiert ist, dass dieser im Falle eines Unfalls dokumentiert, ob zum Unfallzeitpunkte der Fahrer bzw. die Fahrerin oder das Automatisierungssystem das Fahrzeug gesteuert hat. Es erfolgt keine kontinuierliche Speicherung von Daten, es werden nur die letzten Sekunden vor dem Ereignis gespeichert. Zudem wird in der Vernehmlassungsvorlage zur AFV deutlich, dass die Datenaufzeichnung mit dem Ziel einer nachträglichen Auswertung von Ereignissen reguliert wird. Es sind keine Bestimmungen zur Vernetzung bzw. zum Datenaustausch in Echtzeit bzw. während der Fahrt enthalten.

Aufbauend auf einer Inkraftsetzung der vorliegenden Teilrevision des SVG und der Vernehmlassungsvorlage der AFV kann der folgende zusätzliche Regulierungsbedarf abgeleitet werden, der bei einer Realisierung der erarbeiteten Konzepte zu den Übergängen entsteht:

- Für den Fall eines starken (öffentlichen) Datenverbunds muss der dafür notwendige Datenaustausch reguliert werden. Hierbei ist festzulegen, welche Daten in welcher Auflösung durch das Fahrzeug bereitzustellen sind und welche Daten empfangen sowie verarbeitet werden müssen. Andererseits muss reguliert werden, ob Informationen aus dem Datenaustausch im Fahrzeug gespeichert werden müssen und wenn ja, nach welchen Standards. Der Datenaustausch geht dabei deutlich über die bisher in der AFV aufgeführten Anforderungen an den Fahrmodusspeicher hinaus, bspw. in Bezug auf das kontinuierliche Empfangen und Versenden von Daten oder die Erfassung und Verarbeitung von Umfelddaten (Meteorologie, Lichtintensität, Markierung etc.).
- Die in den Übergangskonzepten enthaltene "Rückfallebene" ist rechtlich zu definieren. Die Rückfallebene wird aktiv, nachdem das Fahrzeug den risikominimalen Zustand erreicht hat (und beispielsweise auf einem Pannestreifen zum Stehen gekommen ist). Es ist denkbar, dass in diesem Fall die Verkehrsmanagementzentrale benachrichtigt werden muss, damit diese allfällige Massnahmen (bspw. Sperrung Pannestreifen oder Reduktion Höchstgeschwindigkeit auf dem Nationalstrassenabschnitt) einleiten kann. Zudem könnte der Notfalldienst der zuständigen Polizeibehörden eingeschaltet werden, wenn die Person im Fahrzeug der Übernahmeaufforderung nicht nachgekommen ist. Dabei ist wahrscheinlich, dass sich der Notfalldienst der Polizei mit dem Fahrzeug bzw. mit den Insassen in Verbindung setzt, eine Situationsaufnahme durchführt und allfällige Rettungsmassnahmen einleitet. Bei der Regulierung muss der Rahmen definiert werden, wie diese Kommunikation technisch erfolgt und wer für die Abwicklung entsprechender Meldungen zuständig ist.
- Für den Fall einer Datenlösung auf Ebene Fahrzeuge/Hersteller müssen neue Signale für Betriebswechsellpunkte zur Steuerungsübergabe ans System bzw. an den/die Fahrer/in geschaffen werden. Diese Signale zeigen an, wo der Übergang vom

automatisierten Fahren zum konventionellen Fahren startet bzw. wo eine Abgabe ans Automatisierungssystem erfolgen kann oder muss. Die Signale sind international abzustimmen und nachher in der SSV zu verankern.

- Zur Realisierung des betrachteten Übergangskonzepts zur "Aktivierung der Fahrstreifensteuerung" ist eine neue Signalisation für Fahrstreifen notwendig, die nur von automatisierten Fahrzeugen befahren werden dürfen. Dieses Signal ist festzulegen und in der SSV zu verankern.

## 8 Fazit und Empfehlungen

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden wesentliche Übergänge des automatisierten Fahrens identifiziert, ihre Häufigkeit analysiert und auf Basis der heutigen Situation auf exemplarischen Beispielabschnitten mögliche Konzepte zur Integration des automatisierten Fahrens erarbeitet. Diese Konzepte wurden den vielfältigen Anforderungen im Strassenverkehr gegenübergestellt und eine Beurteilung der Wirkungen im Bereich des Verkehrsflusses und der Verkehrssicherheit vorgenommen.

Über alle erarbeiteten Konzepte zu den Übergängen können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die qualitative Einschätzung der Folgen auf die objektive sowie subjektive Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss (Verkehrskapazität, Zuverlässigkeit) zeigt auf, dass bei den betrachteten Übergängen meist eine Verbesserung, jedoch nie eine Verschlechterung gegenüber der heutigen Situation eintreten dürfte. Sowohl die Verkehrssicherheit als auch der Verkehrsfluss profitieren in der Regel von den erarbeiteten Konzepten.
- Bei den am häufigsten auftretenden Übergängen (Verlassen der HLS, Einfahren in die HLS, Wechsel Verkehrszustand) werden teilweise deutliche Verbesserungen bei der Verkehrssicherheit und beim Verkehrsfluss erwartet. Damit dürften die erarbeiteten Konzepte einen grossen Einfluss auf das Gesamtverkehrssystem haben.
- Die Folgen der Konzepte unterscheiden sich je nach Modell der Datenübertragung. Mit einem starken (öffentlichen) Datenverbund werden oft bessere Wirkungen bzgl. Verkehrssicherheit und Verkehrsfluss erreicht. Gründe sind die bessere Verfügbarkeit bzw. Bündelung von Informationen sowie die stärkere Berücksichtigung der systemischen Infrastrukturbetreibersicht. Wird der Datenaustausch auf der Ebene Fahrzeuge/Hersteller organisiert, dürfte ein geringes Interesse zur Optimierung des Strassenbetriebs bestehen. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Resultaten zum ASTRA-Forschungspaket zum automatisierten Fahren [1313]. Im Rahmen des Teilprojekts 4 wurde aufgezeigt, dass grosse Leistungsfähigkeitsgewinne nur im Fall eines starken Datenverbund erreichbar sind. Mit einem starken (öffentlichen) Datenverbund werden geringere Folgezeitlücken und in der Folge erhöhte Strassenkapazitäten, eine bessere Kooperation und damit homogenere Verkehrsflüsse, geringere Risiken in kritischen Zonen (Schlechtwetter, Stau) und teilweise eine geringere Unfallwahrscheinlichkeit erreicht.
- Die erarbeiteten Konzepte nehmen die strategischen Anforderungen des ASTRA im Allgemeinen gut auf. Mit einem starken (öffentlichen) Datenverbund werden die Anforderungen bei den betrachteten Übergängen tendenziell besser erreicht. Es steigt jedoch der Organisationsbedarf sowie der Bedarf an Systemen zur Datenaustausch und damit auch der finanzielle Aufwand.
- Die Gewinne bei der Verkehrssicherheit und Verkehrsfluss machen das automatisierte Fahren attraktiv. Es besteht daher das Potenzial, dass die Verkehrsnachfrage auf den HLS steigen wird. Die Wirkungen wurden hier aber nicht untersucht.

Aus der vorliegenden Untersuchung kann der folgende Bedarf an Forschung und notwendigen Folgearbeiten abgeleitet werden:

- Neben den fünf betrachteten Übergangstypen werden noch einige andere Übergänge im Zusammenhang mit dem automatisierten Fahren auftreten. Diese sind ebenfalls zu erforschen und konzeptionell zu erarbeiten.
- In Bezug auf den Übergangstyp "Witterungswechsel auf schlecht" ist derzeit unklar, ob der Mensch oder die AF besser reagiert, wenn das erste Fahrzeug in die entsprechende Zone fährt und die ODD verlässt. Diese Fragen sollten unter Berücksichtigung des technischen Fortschritts der Automatisierungssysteme weiter untersucht werden.
- Bei den für die Übergänge vom Mischverkehr zum konventionellen Fahren notwendigen Pannestreifen sind die geometrischen Anforderungen und die Verfügbarkeit vertieft zu klären, insbesondere im Zusammenhang mit schmalen Seitenstreifen und Trennstreifen, wie sie heute teilweise auf dem Nationalstrassennetz auftreten. Wenn

die hier gefundenen Konzepte umgesetzt werden sollen, kann ein Anpassungsbedarf der Infrastruktur daraus abgeleitet werden.

- Die notwendigen Infrastrukturen und Systeme zur Etablierung des Datenaustausches, insbesondere im Fall eines starken Datenverbunds, sind zu untersuchen. Dabei sind Datenstandards zu entwickeln, mit den Fahrzeugherstellern abzustimmen und rechtlich zu verankern. Beim Betrieb des Datenverbunds muss geklärt werden, wer dafür zuständig ist. Dabei sind verschiedene Rollenteilungen denkbar, wie einen Betrieb durch die öffentliche Hand selbst oder eine Vergabe dieser (öffentlichen) Aufgabe an einen Privaten.
- Die in den Konzepten angenommene "Rückfallebene" ist konzeptionell und organisatorisch zu entwickeln, international abzustimmen und in die Regulierung der Schweiz zu überführen. Dabei sind vor allem die Rollen der Verkehrsmanagementzentrale und der Notfalldienste der Polizeibehörden zu definieren.





## Abkürzungsverzeichnis

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
ACC	Adaptive Cruise Control, adaptiver Tempomat bzw. Abstandsregler
AF	Automatisiertes Fahren
AFV	Verordnung über das automatisierte Fahren
ASP	Abendspitzenstunde
ASTRA	Bundesamt für Strassen
DTV	Durchschnittlicher Tagesverkehr
HLS	Hochleistungsstrassen
HVS	Hauptverkehrsstrassen
LI	Lieferwagen
LW	Lastwagen
MR	Motorrad
MSP	Morgenspitzenstunde
NPVM	Nationales Personenverkehrsmodell
ODD	Operational Design Domain, Betriebsbedingungen für den Einsatz von AF-Systemen
PW	Personenwagen
SAE	Society of Automotive Engineers, internationale Gesellschaft zur Normierung
SSV	Signalisationsverordnung
SV	Schwerverkehr
SVG	Strassenverkehrsgesetz
TOC	Transition of control, Übergabe der Verantwortung zur Lenkung des Fahrzeugs
V2V	Vehicle-to-Vehicle, Kommunikation zwischen Fahrzeugen
V2I	Vehicle-to-Infrastructure, Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur
VRV	Verkehrsregelverordnung



# Literaturverzeichnis

## Bundesgesetze

- [1] Schweizerische Eidgenossenschaft (1958), „**Strassenverkehrsgesetz vom 19. Dezember 1958 (SVG)**“, SR 741.01, [www.admin.ch](http://www.admin.ch).

## Verordnungen

- [2] Schweizerische Eidgenossenschaft (1999), „**Organisationsverordnung für das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (OV-UVEK) vom 6. Dezember 1999**“, SR 172.217.1, [www.admin.ch](http://www.admin.ch).
- [3] Schweizerische Eidgenossenschaft (1962), „**Verkehrsregelverordnung vom 13. November 1962 (VRV)**“, SR 741.11, [www.admin.ch](http://www.admin.ch).
- [4] Schweizerische Eidgenossenschaft (1979), „**Signalisationsverordnung vom 5. September 1979 (SSV)**“, SR 741.21, [www.admin.ch](http://www.admin.ch).
- [5] Schweizerische Eidgenossenschaft (2023), „**Verordnung über das automatisierte Fahren**“, Vernehmlassungsvorlage, [www.admin.ch](http://www.admin.ch).

## Strategische Dokumente des Bundes

- [6] Schweizerische Eidgenossenschaft (2017), „**Zukunft Mobilität Schweiz, UVEK-Orientierungsrahmen 2040 vom 15. August 2017**“, [www.admin.ch](http://www.admin.ch).
- [7] Bundesamt für Strassen ASTRA (2016), „**Strategische Ausrichtung; Vision, Mission, Leitsätze und Ziele vom Dezember 2016**“.
- [8] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Teilstrategie Verkehrsfluss**“, Ausgabe 2019 V1.1.
- [9] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Teilstrategie Verkehrssicherheit**“, Ausgabe 2020 V1.0.
- [10] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Teilstrategie Intelligente Mobilität**“, Ausgabe 2019 V1.0.
- [11] Bundesamt für Strassen ASTRA (2021), „**Sachplan Verkehr, Teil Infrastruktur Strasse**“. <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/weiterentwicklung/raeumliche-abstimmung.html>
- [12] Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2020): „**Nationales Personenverkehrsmodell**“. <https://www.are.admin.ch/are/de/home/mobilitaet/grundlagen-und-daten/verkehrsmodellierung/npvm.html>

## Forschungen und Projekte ASTRA

- [13] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Forschungspaket Auswirkungen des automatisierten Fahrens**“, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [14] Axhausen, K.W., Livingston, C., Hörl, S., Bruns, F., Fischer, R. & Tasnády, B. (2020). „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 2: Verkehrliche Auswirkungen und Infrastrukturbedarf**“, ASTRA 1683.
- [15] Hörl, S., Becker, F., Dubernet, T. J. P. & Axhausen, K. W. (2019). „**Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung**.“ ASTRA 1650.
- [16] Busch, F., Krause, S., Fehn, F., Richner, M., Armbruster, S. & Winzer, T. (2020). „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr**“, ASTRA 1684.
- [17] Bundesamt für Strassen ASTRA (2023), „**Weiterentwicklung des Nationalstrassennetzes**“. <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/weiterentwicklung.html>
- [18] Bundesamt für Strassen ASTRA (2020), „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Erkenntnisse und Massnahmen aus Sicht des ASTRA**“. [https://www.mobilityplatform.ch/fileadmin/mobilityplatform/normenpool/21781\\_1691\\_Inhalt.pdf](https://www.mobilityplatform.ch/fileadmin/mobilityplatform/normenpool/21781_1691_Inhalt.pdf)
- [19] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), „**Stufen der Automatisierung**“. <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/intelligente-mobilitaet/stufen-der-automatisierung.html>
- [20] Bundesamt für Strassen ASTRA (2019), „**Angebotsziele Nationalstrassen, Synthesebericht und Handbuch für die streckenbezogene Ermittlung**“ EBP. Nicht öffentlich.
- [21] Bundesamt für Strassen ASTRA (2023), „**Verkehrsentwicklung und Verkehrsfluss**“, Ausgabe 2022 V1.0.

---

**Regularien und Normen.**

- [22] VSS 40 005 Verkehrserhebungen Ganglinien und durchschnittlicher werktäglicher Verkehr
- [23] UN Regulation No. 157, Addendum 156 Agreement Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations (Revision 3), E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.156.
- 

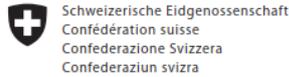
**Dokumentation**

- [24] BaslerFonds, Schweizerischer Städteverband und weitere Partner (Oktober 2017), „**Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz**“, *Schlussbericht Grundlagenphase A*.
- [25] Perret, F., Arnold, T., Fischer, R., De Haan, P. & Haefeli, U. (2020). „**Automatisiertes Fahren in der Schweiz: Das Steuer aus der Hand geben?**“, TA-SWISS / Volume 71, ISBN: 978-3-7281-3996-2.
- [26] Hoogendoorn, R., van Arem, B. & Hoogendoorn, S. (2014). „**Automated Driving, Traffic Flow Efficiency, and Human Factors: Literature Review**“, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol 2422, Issue 1, 2014.
- [27] Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M., Kranke, F. & Helbing, D. (2007). „**Jam-Avoiding Adaptive Cruise Control (ACC) and Its Impact on Traffic Dynamics**“. In Traffic and Granular Flow 2005, Springer, New York. 2007, 633–643.
- [28] Krause, S., Motamedidehkordi, N., Hoffmann, S., Busch, F., Hartmann, M. & Vortisch, P. (2017). „**Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstrasseninfrastruktur**“. Hg. v. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT Schriftenreihe, Heft 296).
- [29] van Arem, B., van Driel, C. J. G. & Visser, R. (2006). „**The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics**“, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 7, no. 4, 429–436, Dec. 2006, doi: 10.1109/TITS.2006.884615
- [30] Friedrich, B. (2015). „**Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge**“, in Maurer, M., Gerdes, J., Lenz, B. & Winner, H. (eds). Autonomes Fahren. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, [https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9_16)
- [31] Wagner, P. (2015). „**Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen**“, in Maurer, M. et al. (Hrsg.), Autonomes Fahren: Springer.
- [32] Harper, C., Hendrickson, C., Mangones, S. & Samaras, C. (2016). „**Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions**“, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 72, 2016, 1–9.
- [33] Lubbe, N., Jeppsson, H., Ranjbar, A., Fredriksson, J., Bärnman, J. & Östling, M. (2018). „**Predicted road traffic fatalities in Germany: The potential and limitations of vehicle safety technologies from passive safety to highly automated driving**“, Conference proceedings International Research Council on the Biomechanics of Injury, IRCOBI. Vol. 2018-September, 17–52.
- [34] Deublein, M. (2020). „**Automatisiertes Fahren Mischverkehr: Aspekte der Sicherheit bei einer zunehmenden Automatisierung des Strassenverkehrs in der Schweiz**“, bfu Forschung 2.376.
- [35] SAE International (2021), „**Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles**“, 04-2021 (J3016).
- [36] Shladover, S. (2017). „**Potential implications of road vehicle automation for managed lanes (presentation)**“, Transportation Research Board Annual Meeting Session 181, Washington DC.
- [37] Lee, C. W., Nayeer, N., Garcia, D. E., Agrawal, A. & Liu, B. (2020). „**Identifying the Operational Design Domain for an Automated Driving System through Assessed Risk**“, 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2020, 1317–1322, doi: 10.1109/IV47402.2020.9304552
- [38] Czarniecki, K. (2018). „**Operational Design Domain for Automated Driving Systems - Taxonomy of Basic Terms**“, doi:10.13140/RG.2.2.18037.88803
- [39] Vogelpohl, T., Kühn, M., Hummel, T., Gehlert, T., Vollrath, M. (2018). „**Transitioning to manual driving requires additional time after automation deactivation**“, in Transportation research part F: traffic psychology and behaviour (55), 464–482.
- [40] Wintersberger, P., Green, P. & Riener, A. (2017). „**Am I Driving or Are You or Are We Both? A Taxonomy for Handover and Handback in Automated Driving**“, doi: 10.17077/drivingassessment.1655
-

- [41] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) e.V. (2016), „**Takeover times in highly automated driving**“.
- [42] Banks, V., Eriksson, A., O'Donoghue, J. & Stanton, N. (2018). „**Is partially automated driving a bad idea? Observations from an on-road study**“, Applied Ergonomics, Volume 68, 138–145.
- [43] Endsley, M. R. & Kiris, E. O. (1994). „**The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation**“. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Vol. 37, No. 2, 1995, 381–394.
- [44] Naujoks, F., Forster, Y., Wiedemann, K. & Neukum, A. (2017). „**A Human-Machine Interface for Cooperative Highly Automated Driving**“, in Stanton, N., Landry, S., Di Bucchianico, G. & Vallicelli, A. (eds) Advances in Human Aspects of Transportation. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 484. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41682-3\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41682-3_49)
- [45] Voegelé, T. & Zhivov, N. (2018). „**Cooperative Mobility Systems and Automated Driving, Summary and Conclusions of the ITF Roundtable on Cooperative Mobility Systems and Automated Driving**“ 167, OECD International Transport Forum, Paris.
- [46] UVEK (2018), „**Bereitstellung und Austausch von Daten für das automatisierte Fahren im Strassenverkehr**“, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bern, 07.12.2018.
- [47] Agora Verkehrswende (2020), „**Auto tankt Internet. Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur**“. [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2020/Automatisiertes\\_Fahren/Agora-Verkehrswende\\_Auto-tankt-Internet.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2020/Automatisiertes_Fahren/Agora-Verkehrswende_Auto-tankt-Internet.pdf)
- [48] Zimmermann, J. & Deublein, M. (2024) (in press). „**Bedarfsermittlung zur Sensibilisierung der CH-Wohnbevölkerung über Fahrerassistenzsysteme**“. Zeitschrift für Verkehrssicherheit.
- [49] Tilg, G., Stüger, P., Spangler, M. & Listl, G. (2022). „**Leistungssteigerung städtischer Strassennetze – Schlussbericht**“, Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV).
- [50] Milanés, V. & Shladover, S. E. (2014). „**Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data**“, in Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 48, 285–300. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.09.001>
- [51] Olstam, J., Johansson, F., Alessandrini, A., Sukennik, P., Lohmiller, J. & Friedrich, M. (2020). „**An Approach for Handling Uncertainties Related to Behaviour and Vehicle Mixes in Traffic Simulation Experiments with Automated Vehicles**“, in Journal of Advanced Transportation, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8850591>
- [52] Zeidler, V., Buck, H. S., Kautzsch, L., Vortisch, P. D. P. & Weyland, C. (2018). „**Simulation of Autonomous Vehicles Based on Wiedemann's Car Following Model**“, in Transportation Research Record (Vol. 114, p. e00146). <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00146>
- [53] Brunner, J. (2023). „**Konnektivität und Kapazität – Verkehrsfluss durch Vernetzung**“. In Strasse und Verkehr, Heft 6/2023. [https://www.vss.ch/fileadmin/redacteur/e-paper\\_SuV/e-paper\\_SUV\\_06\\_23/#42](https://www.vss.ch/fileadmin/redacteur/e-paper_SuV/e-paper_SUV_06_23/#42)
- [54] Milakis, D. (2019). „**Long-term implications of automated vehicles: an introduction**“ Transport Reviews. Routledge. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1545286>
- [55] Do, W., Rouhani, O. M. & Miranda-Moreno, L. (2019). „**Simulation-Based Connected and Automated Vehicle Models on Highway Sections: A Literature Review**“, Journal of Advanced Transportation, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9343705>
- [56] Münchner Cluster für die Zukunft der Mobilität in Metropolregionen (Mcube) (2021), „**Testkreuzung für urbanes automatisiertes und vernetztes Fahren**“. <https://www.mcube-cluster.de/projekt/testkreuzung/>
- [57] Bad Birnbach (2023), „**AUTONOMER KLEINBUS**“. <https://www.badbirnbach.de/geschichten/autonomer-kleinbus>
- [58] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) (2023), „**Autonomes Fahren Level 3: Freihändig durch den Stau**“. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/technik-vernetzung/autonomes-fahren-staupilot-s-klasse/>
- [59] Eymann, G. (2019). „**Automatisiertes Fahren: Sensortechniken im Check**“. <https://www.vdi.de/news/detail/automatisiertes-fahren-sensortechniken-im-check>
- [60] National Instruments (2020), „**Imminent Trade-Offs for Achieving Safe Autonomous Driving**“ . [https://download.ni.com/evaluation/omni/en/37042\\_Imminent\\_Trade-Offs\\_for\\_Safe\\_Autonomous\\_Driving\\_FINAL\\_WEB.pdf](https://download.ni.com/evaluation/omni/en/37042_Imminent_Trade-Offs_for_Safe_Autonomous_Driving_FINAL_WEB.pdf)
- [61] SAE International (2023), „**Volvo engineers Luminar lidar into 2024 EX90**“. <https://www.sae.org/news/2022/12/luminar-lidar-for-volvo-ex90>

- 
- [62] TU Wien (2020), „**High resolution long range Lidar for autonomous driving (LiDcAR)**“. <https://www.acin.tuwien.ac.at/en/project/english-high-resolution-long-range-lidar-for-autonomous-driving-lidcar/>
- 
- [63] Grant., A (2022). „**Seeing in the rain – how good is your AV’s sensor performance?**“. <https://www.autonomousvehicleinternational.com/features/seeing-in-the-rain-how-good-is-your-avs-sensor-performance.html>
- 
- [64] Dreissig, M., Scheuble, D., Piewak, F. & Boedecker, J. (2023). „**Survey on LiDAR Perception in Adverse Weather Conditions**“. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.06312>
- 
- [65] Thuy, M. & León, F. (2010). „**Lane Detection and Tracking Based on Lidar Data**“ Metrology and Measurement Systems. <https://doi.org/10.2478/v10178-010-0027-3>
- 
- [66] Ghallabi, F., Nashashibi, F., El-Haj-Shhade, G. & Mittet, M. (2018). „**LIDAR-Based Lane Marking Detection For Vehicle Positioning in an HD Map**“ 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569951>
- 
- [67] Li, H., Bammingner, N., Magosi, Z. F., Feichtinger, C., Zhao, Y., Mihalj, T., Orucevic, F. & Eichberger, A. (2023). „**The Effect of Rainfall and Illumination on Automotive Sensors Detection Performance**“ Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su15097260>
- 
- [68] Zhenji Lu, Z., Happee, R., Cabrall, C. D. D., Kyriakidis, M. & de Winter, J. C. F. (2016). „**Human factors of transitions in automated driving: A general framework and literature survey**“ Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Volume 43, 2016, 183–198, ISSN 1369-8478, <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.10.007>.
- 
- [69] Europäische Union (EU) (2022), Durchführungsverordnung (EU) 2022/1426.
- 
- [70] Hackenfort, M. (2012). „**Jenseits des Vorsatzes – Eine Untersuchung zu kognitiven Ursachen von regelwidrigem Verhalten im Radverkehr**“, in Schwarzenegger, C., & Nägeli, R. (Hrsg.), 5. Zürcher Präventionsforum, Europa Institut Zürich, Band 134, Zürich.
- 
- [71] Beratungsstelle für Unfallverhütung (2024), **Rechtsfrage „Reaktionszeit und Sicherheitsabstand im Strassverkehr – was verlangen Gesetz und Rechtsprechung?“**. <https://www.bfu.ch/de/services/rechtsfragen/reaktionszeit-sicherheitsabstand-verkehr>
-

# 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: 18.03.2024

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: MB4\_20\_05B\_01  
Projekttitel: Übergänge zwischen Bereichen mit Mischverkehr und ausschliesslich automatisiertem Verkehr  
Enddatum: 31.03.2024

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden in Bezug auf das automatisierte Fahren in der Schweiz folgende Resultate generiert:

- Massgebliche Kriterien, welche die Übergänge zwischen konventionellem Verkehr und Mischverkehr sowie zwischen Mischverkehr und ausschliesslich automatisiertem Verkehr definieren (Stichwort operational design domain, ODD)
- Auswahl der besonders relevanten Übergänge
- Räumliche und zeitliche Häufigkeit des Auftretens dieser Übergänge unter Berücksichtigung der Zukunftsszenarien zum automatisierten Fahren für den Personen- und Güterverkehr auf der Strasse
- Anforderungen an die Übergänge mit Fokus Verkehrssicherheit und Verkehrsfluss, die aus den übergeordneten und strategischen Dokumenten des Bundes abgeleitet werden können
- Konzepte zu Gestaltung und Betrieb, die für die ausgewählten Übergänge denkbar sind
- Qualitative Einschätzung zu den Folgen dieser Konzepte auf Verkehrsfluss (Kapazität) und Verkehrssicherheit unter Berücksichtigung der heutigen Situation und der Schweizer Gegebenheiten (hohe Anschlussdichte, beengte Platzverhältnisse, Wetter)
- Abgeleitete (allgemeinere) Prinzipien für die Gestaltung und den Betrieb der betrachteten Übergänge
- Ergänzungs- und Anpassungsbedarf in der Regulierung unter Berücksichtigung der jüngsten Teilrevision des SVG und des Entwurfs der AFV

## Zielerreichung:

Die gemäss dem Forschungsgesuch (Fassung vom 15.03.2022) aufgeführten Forschungsfragen konnten bearbeitet werden, die Projektziele wurden erreicht. Insbesondere konnte die Lücke in der aktuellen Forschung geschlossen werden, welche Herausforderungen bei den wesentlichen Übergängen des automatisierten Fahrens für das Hochleistungsstrassennetz in der Schweiz bestehen und mit welchen Lösungsansätzen in Bezug auf Infrastruktur und Betrieb diese angegangen werden können.

## Folgerungen und Empfehlungen:

Der Anpassungsbedarf an den Rechtsinstrumenten zur Regulierung des Strassenverkehrs wurde beschrieben. Insbesondere das SVG und die AFV müssten zur Realisierung der gefundenen Konzepte hinsichtlich des Datenaustauschs und der Rückfallebene erweitert werden. Zudem sind Anpassungen an der SSV notwendig. Die für die Etablierung der gefundenen Übergangskonzepte notwendige Datenübertragung und die Anforderungen an die entsprechenden Daten wurden grob beschrieben und in Bezug auf zwei verschiedene Fälle der Vernetzung differenziert. Schliesslich wurde der Bedarf an weiterer Forschung und der notwendigen Folgearbeiten abgeleitet. Diese betreffen insbesondere die Untersuchung weiterer Übergangstypen, der Eintritt des ersten Fahrzeugs in eine Schlechtwetterzone, die geometrischen Anforderungen an Standflächen im risikominimalen Zustand und die Systeme für den Datenaustausch.

## Publikationen:

bisher keine

## Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name:  Vorname:

Amt, Firma, Institut:

## Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Im Mischverkehr zwischen konventionell bedienten Fahrzeugen und solchen mit höheren Automationsstufen ist deren Verhältnis zueinander und der Einfluss auf die Erfordernisse der Infrastruktur klärungsbedürftig, was in dem hier vorliegenden Projekt systematisch aufgegriffen wurde. Die Begleitkommission (BK) ist der Auffassung, dass das Projektteam auf wissenschaftlich fundierte Weise Problembereiche sowie Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt hat. Die dazu hergeleiteten, durch die BK als valide erachteten Beurteilungskriterien, Prinzipien und Folgerungen erscheinen trotz der sich weit in die Zukunft reichenden Implikationen plausibel und sehr gut nachvollziehbar, sie geben wertvolle Handlungsempfehlungen für Fachpersonen in der Verkehrs- und Infrastrukturplanung und erlauben einen seriösen Blick in eine Zukunft mit manuell gesteuerten und automatisierten Fahrzeugen.

##### Umsetzung:

Nach der prägnanten Darstellung des Stands der Forschung, der Definition von Annahmen und Abgrenzungen werden zunächst Merkmale von Übergängen dargelegt, die zu einer begründeten und durch Fachpersonen abgestützten Auswahl von fünf Übergangstypen führt. Diese werden im Folgenden systematisch anhand von sieben Kriterien – u. a. Verkehrsnachfrage, Verkehrszustand, Konstanz der Geschwindigkeit und der Sicherheit – bewertet, was schlussendlich zu fundierten Annahmen über die Gestaltung und den Betrieb in Zukunft führt. Die jeweilige Bewertung dieser Annahmen erlaubt eine fundierte Ableitung von Konsequenzen für die Eigentümer dieser Bereiche.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

An mehreren Stellen wird im Bericht auf zutreffende Weise darauf hingewiesen, dass sich die dort formulierten Annahmen insbesondere hinsichtlich eines zukünftig (nicht) existierenden Datenverbunds ändern könnten. In gleicher Weise können technische Entwicklungen – etwa hinsichtlich der Art und des Umfangs risikominimierter Zustände – anders, als abgeschätzt eintreten. Sämtliche Entwicklungen sind insofern weiter zu beobachten und entsprechende Erkenntnisse zu aktualisieren.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Das Projekt verdeutlicht die Dringlichkeit, die zunehmende Verbreitung automatisierter Fahrzeuge in die entsprechenden Normen für die Ausgestaltung der Infrastruktur aufzunehmen. Dazu liefert dieses Projekt essenzielle Informationen.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Hackenfort

Vorname: Markus

Amt, Firma, Institut: ZHAW, Angewandte Psychologie, Professur für Human Factors Psychology

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

