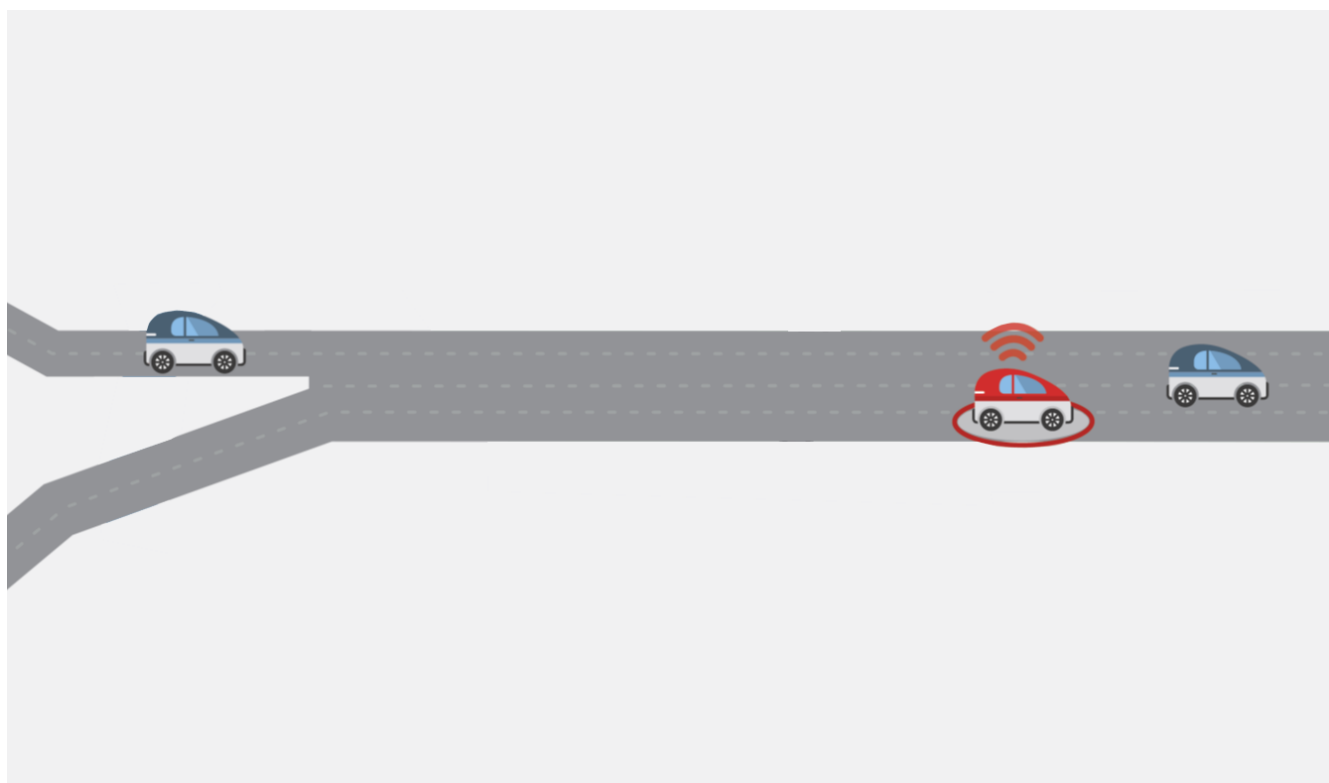


Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz

Schlussbericht Modul 3a «Verkehrstechnik»
Definitive Fassung vom 04.04.2018



Projektbegleitgruppe

Bestehend aus Vertretern von

Schweizerischer Städteverband SSV

Stadt Zürich (TAZ, DAV)

Stadt Bern (Verkehrsplanung)

Bernmobil

Kanton St. Gallen (TBA)

Kanton Zürich (AFV)

Kanton Basel-Stadt (Amt für Mobilität)

Kanton Obwalden (Amt für Raumentwicklung und Verkehr)

Projektteam

Remo Fischer

Fabienne Perret

Lorenz Raymann

Bence Tasnády

EBP Schweiz AG

Mühlebachstrasse 11

8032 Zürich

Schweiz

Telefon +41 44 395 16 16

info@ebp.ch

www.ebp.ch

Druck: 04. April 2018

180404_Zusammenfassung.docx

Projektnummer: 216184

Zusammenfassung

Der vorliegende Folienbericht zeigt mögliche Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Verkehrstechnik auf. Dazu gehört das Fahrverhalten automatisierter Strassenfahrzeuge, die Quantifizierung der Kapazitätseffekte, denkbare Massnahmen im Verkehrsmanagement sowie Folgerungen für den Infrastrukturbedarf. Der Bericht bildet eine Grundlage für strategische Planungen und baut auf der Grundlagenstudie¹ auf.

Der Einsatz automatisierter Fahrzeuge betrifft auch viele weitere Themen wie beispielsweise Raum- und Stadtentwicklung, Kollektiv- und Güterverkehr oder Verkehrssicherheit. Entsprechende Aspekte werden im vorliegenden Bericht nur am Rande behandelt. Hierzu wird auf die anderen Vertiefungsstudien zum «Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag» verwiesen.

Fahrverhalten automatisierter Strassenfahrzeuge

Die Hauptfrage in der Verkehrstechnik zum Einsatz automatisierter Fahrzeuge ist, welche Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen eingehalten wird. Davon hängt die Kapazität einer Strasseninfrastruktur ab. Heutige Folgezeitlücken könnten durch technische Systeme um die menschlichen Zeitanteile in Bezug auf Sehen/Erkennen von Ereignissen, Reaktions- und Fussumsetzzeit reduziert werden. Auf Hochleistungsstrassen werden heute beispielsweise mittlere Zeitlücken von 1.1 bis 2.0 Sekunden gemessen, an städtischen Knoten durch Antizipation teilweise deutlich tiefere. Experten schätzen für automatisierte Fahrzeuge Reduktionspotenziale der Zeitlücke auf 0.3 – 0.9 Sekunden. Durch die Automatisierung dürften die Zeitlücken auch harmonisiert werden. Zudem wird insbesondere an Knoten schneller und einheitlicher beschleunigt, sodass höhere Räumgeschwindigkeiten erreicht werden. Auf Hochleistungsstrassen werden schnellere Fahrstreifenwechsel und homogenere Geschwindigkeiten erwartet. Sind die Fahrzeuge vernetzt, wird davon ausgegangen, dass kleinere Zeitlücken für Fahrstreifenwechsel benutzt werden können.

Kapazitätseffekte

Die Kapazität wird als grösste Verkehrsstärke betrachtet, die ein Verkehrsstrom an einem bestimmten Querschnitt erreichen kann. Können die tatsächlichen Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen infolge der Automatisierung reduziert werden, stellen sich positive Kapazitätswirkungen bei der bestehenden Infrastruktur ein. Die Zunahme verhält sich überproportional zur Durchdringung der Gesamtflotte mit automatisierten Fahrzeugen. In den Zwischenzuständen mit Mischverkehr von automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen fallen die Kapazitätseffekte entsprechend deutlich geringer aus. Simulationsergebnisse für Hochleistungsstrassen weisen derzeit eine Kapazitätserhöhung von maximal rund 30% für eine Zeitlücke von 0.9 Sekunden und vollständig automatisiertem Fuhrpark auf freien Strecken aus. Im Schweizerischen Hochleistungsstrassennetz sind allerdings die dichten Ein- und Ausfahrten und Verzweigungen kapazitätsbestimmend. Auf diesen

1 EBP: «Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz», Schlussbericht Grundlagenanalyse (Phase A); im Auftrag von BaslerFonds und dem Schweizerischen Städteverband und weiteren Partner; 24.10.2017

Abschnitten sind die Folgezeitlücken heute schon sehr gering und durch Automatisierung nur noch geringfügig zu optimieren. Im untergeordneten Netz sind die Kapazitätseffekte geringer als auf den Hochleistungsstrassen und in den Knoten geringer als auf der freien Strecke. Für städtische Knoten werden Kapazitätseffekte in der Grössenordnung von 15% erwartet (bei Reduktion der Zeitlücke um 0.3 Sekunden und vollständiger Durchdringung).

Die Stabilität des Verkehrsflusses steigt mit automatisierten Fahrzeugen an. Bei gleichen, hohen Verkehrsbelastungen können Verkehrszusammenbrüche mit einem entsprechenden Leistungsabfall reduziert werden.

Mobilitäts- und Verkehrsmanagement

Die Automatisierung stellt neue Anforderungen an das Mobilitätsmanagement (Beeinflussung der Nachfrage) und Verkehrsmanagement (Gestaltung des Verkehrsablaufs im Strassennetz). Dabei sind zahlreiche neue und bestehende Instrumente denkbar, die sich in Bezug auf den notwendigen Vernetzungsgrad, auf die vorausgesetzte Durchdringung der Fahrzeugflotte mit automatisierten Fahrzeugen und auf betroffene Mobilitätsfreiheiten (Zeitwahl, Verkehrsmittelwahl, Routenwahl, Fahrzeugbesetzung, Steuerung Mensch oder System) unterscheiden. Zu den diskutierten Instrumenten gehören Verbote von Leerfahrten, die Zuteilung von Slots zum Befahren der Infrastruktur oder das Einführen von Zonen, die ausschliesslich automatisierten Fahrzeuge vorbehalten sind. Sofern die Mobilitätsfreiheiten nicht mit Verboten und Strafen eingeschränkt werden sollen, kann der Verkehr mit zeitlichen (Bsp. Priorisierung an LSA) oder finanziellen Anreizen (Bsp. Mobility Pricing) beeinflusst werden. Das heute für Städte besonderes wichtige Steuerungsinstrument Parkplatzmanagement könnte mit zunehmender Automatisierung aufgrund erhöhter Nutzung von Car- und Ride-Sharing-Diensten sowie allfälliger Leerfahrten im MIV teilweise an Bedeutung verlieren.

Infrastrukturbedarf

Die Kapazitäten der bestehenden Infrastruktur steigen infolge der Automatisierung nur bei hohem Durchdringungsgrad sowie mit tatsächlich reduzierten Zeitlücken auch an kapazitätsbestimmenden «Flaschenhälsen» signifikant an. Mittelfristig zeichnen sich keine massgeblichen Kapazitätssprünge über 20% ab, die deutliche Engpässe auf dem Netz aufheben würden. Werden im Mischverkehr aufgrund von Sicherheitsüberlegungen höhere Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen eingehalten, wäre vorübergehend sogar eine Kapazitätsreduktion nicht auszuschliessen. Längerfristig dürften die Folgezeitlücken automatisierter Fahrzeuge allerdings geringer sein als die heute auftretenden Zeitlücken von menschlichen Fahrern. Diese Entwicklung wird durch die Vernetzung begünstigt. Die Kapazitätseffekte können helfen, Infrastrukturausbauten nicht oder später notwendig werden zu lassen.

Ein Eigentrassee für automatisierte Fahrzeuge (bspw. in den Zwischenzuständen mit Mischverkehr) scheint aus heutiger Sicht in der Schweiz wenig realistisch, da meist kein Platz und eine hohe Knotendichte vorhanden sind. Solange sich menschlich gesteuerte Fahrzeuge auf den Strassen bewegen und sich die Fahrzeuggrössen der massgebenden Nutzungen (bspw. ÖV,

LKW, Winterdienst) nicht verändern, erscheint eine Reduktion der Fahrbahnbreiten nicht realistisch. Solche Flächengewinne stellen sich erst mit dem Einsatz von Kleinfahrzeugen und/oder einer vollständig automatisierten Fahrzeugflotte ein. Werden signifikante Unterschiede bei den räumlichen Verkehrsstärken in den Knoten erreicht, können allenfalls Aufstellflächen angepasst werden. Bei einer hohen Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen ist durch Raum-Zeit-Anmeldungen die Aufhebung von Lichtsignalanlagen denkbar. Wobei hier Fragen des Miteinanders von automatisierten Fahrzeugen, Fussgängern und Velofahrenden noch nicht geklärt sind. In den Städten müssen Haltekanten für Ein-/Aussteiger bspw. von automatisierten Sharing-Diensten und Umschlagflächen für den automatisierten Gütertransport bereitgestellt und deren Nutzung geregelt werden.

Handlungsempfehlungen

Auf Basis dieser Arbeiten im Vertiefungsmodul «Verkehrstechnik» werden im Folgenden Handlungsempfehlungen zuhanden der Behörden mit Fokus Städte und Kantone formuliert, wie die Herausforderungen des automatisierten Fahrens angegangen werden könnten, um Chancen zu nutzen und Risiken zu vermeiden. Diese sind als mögliche Ansätze zu verstehen. Ausgang sind immer die individuellen, strategischen Ziele der genannten Akteure.

Kapazitäten

Empfehlungen

- Kapazitätseffekte im Verkehrsnetz ergeben sich durch automatisierte Fahrzeuge, sofern diese kleinere Zeitlücken als menschlich gesteuerte Fahrzeuge erreichen. Behörden sollten hierzu bessere Kenntnisse über das **tatsächliche Folgeverhalten** der automatisierten Fahrzeuge erwerben. Auf dieser Basis können sie sich bei der Festlegung der Fahrzeugzulassung einsetzen, dass – unter Einhaltung von Sicherheitsstandards – nur Fahrzeuge mit positiven Wirkungen in Bezug auf die Leistungsfähigkeit des Verkehrsnetzes zugelassen werden. → **Kurz- bis langfristig**
- Das Wissen über die **Interaktionen** von automatisierten Fahrzeugen mit dem Fuss- und Veloverkehr sowie dem (nicht-automatisierten) ÖV ist beschränkt. Hierzu müssen Erkenntnisse über die Fähigkeiten und Grenzen von Fahrzeugsystemen gesammelt werden. Bei der Fahrzeugzulassung sollten sich die Behörden von Städten und Kantonen bei der Definition der technischen Anforderungen bzgl. Interaktionen einbringen. → **Kurz- bis mittelfristig**
- In Innenstädten und Agglomerationen sollten **Pilotversuche** von automatisierten Fahrzeugen ermöglicht, begleitet und ausgewertet werden. Insbesondere auch in Bezug auf die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmenden. Dabei ist darauf zu achten, dass verschiedene technologische Ansätze unterschiedlicher Hersteller getestet werden, um das Fahrzeugverhalten möglichst breit beobachten zu können. → **Kurz- bis mittelfristig (evtl. passiv)**

- Zu den vorhandenen (Assistenz-)Systemen sowie den Automatisierungsgraden in der zugelassenen Gesamtflotte sollte ein **Monitoring** durchgeführt werden, um über Grundlagen zu den Fahrzeugfähigkeiten sowie der Durchdringung von Systemen zu verfügen. → **Kurz- bis langfristig**

Verkehrliche Nachfrage

Hintergrund

Das automatisierte Fahren wirkt sich treibend auf die Nachfrage im Strassenverkehr aus (v.a. durch Nutzung der Reisezeit, neue Nutzergruppen und Leerfahrten, siehe auch Grundlagenbericht). Damit steigt der Druck auf die Infrastruktur, die heute in der Schweiz zu Spitzenzeiten bereits hoch ausgelastet ist. Daher besteht ein Bedarf zur Lenkung der Nachfrage, insbesondere in dichten und stark belasteten Räumen. Im Mobilitätsmanagement (Beeinflussung der Nachfrage) und im Verkehrsmanagement (ausgerichtet auf Nutzung der Infrastruktur bzw. Verkehrsablauf) sind griffige Massnahmen zu finden. In Kombination mit zunehmenden Mobilitätsansprüchen kann dies nur erreicht werden, wenn die **Fahrzeugbesetzung** erhöht werden kann und für die gleiche Verkehrsleistung (Pkm) weniger Fahrzeuge und eine geringere Fahrleistung (Fzkm) benötigt werden.

Empfehlungen

- In der Verkehrspolitik sollte ein **öffentlicher Diskurs** zu Risiken eines erhöhten Verkehrsaufkommens infolge der Automatisierung geführt werden. Handlungsbedarf und -ansätze sollten gemeinsam zwischen Politik, der Wirtschaft und der Gesellschaft erörtert werden. → **kurz- bis mittelfristig**
- Im **Verkehrsmanagement** sollte der **Besetzungsgrad** der Fahrzeuge erkannt werden können und mit zunehmender Automatisierung für die Verkehrssteuerung verwendet werden. Dies kann als Basis für eine Priorisierung von Fahrten und Fahrzeugen oder für eine Bepreisung dienen. → **mittel- bis langfristig**
- In der **Verkehrssteuerung** sollten allfällige MIV-Kapazitätsgewinne (bspw. beim Räumen an LSA-Knoten) zugunsten des Fuss- und Veloverkehrs sowie des ÖV aktiv genutzt werden. → **kurz- bis mittelfristig**
- Im **Mobilitätsmanagement** sind mit Push-Massnahmen (Bsp. Instrumente zur Förderung von Ride-Sharing, Reduktion der Parkplatzverfügbarkeit) und Pull-Massnahmen (Bsp. steuerliche Erleichterungen für kollektive Fahrzeugnutzung, Nachhaltigkeitsbonus) hohe Besetzungsgrade zu fördern. → **mittel- bis langfristig**
- In der Verkehrspolitik sollten Instrumente wie **Mobility Pricing** auf Basis des Besetzungsgrades und in Zonen, in denen die Nachfrage die Kapazität übersteigt, geprüft werden. Weiter ist eine Regelung für **Leerfahrten** zu finden (Bsp. Verbot im MIV, für Sharing-Angebote nur mit Nachweise, dass der Betrieb effizienter als im MIV erfolgt). → **mittel- bis langfristig**

Weiterer Infrastrukturbedarf

Empfehlungen:

- Für vollautomatisierte Sharing-Angebote sind **Haltekanten** (Ein-/Aussteigen) und für den Güterverkehr sind **Umschlagflächen** (Ein-/Ausladen) bereitzustellen sowie deren Nutzung zu regeln. Hierzu müssen geeignete Strassenabschnitte bzw. -flächen definiert werden (unter Berücksichtigung von allenfalls freierwerdenden Längsparkierungsflächen), die Signalisationsanforderungen geklärt werden und der Anpassungsbedarf der Verkehrsregelnverordnung geprüft werden. Dies muss spätestens bis zur Inbetriebnahme des ersten vollautomatisierten Sharing-Fahrzeugs erfolgen. → **mittel- bis langfristig**
- Im Zuge der Automatisierung muss laufend geprüft werden, ob **Flächenoptimierungen** in Knoten möglich sind (Bsp. Reduktion Aufstellflächen bei MIV). → **mittel- bis langfristig**
- Es sind Erkenntnisse zur erforderlichen Qualität der **Markierung** und der **Signalisation** für automatisierte Fahrzeuge im Strassenraum zu sammeln (Bsp. Erkennen von Strassenrändern). Die langen Phasen mit Mischverkehr von automatisierten und nicht-automatisierten Fahrzeugen lassen vermuten, dass bestehende Systeme der Markierung und Signalisation noch lange verwendet werden. → **kurz- bis langfristig**
- In Bezug auf die **Vernetzung** zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur (C2I) ist ein Grundsatzentscheid notwendig. Damit verbunden sind die Möglichkeiten der Einflussnahme auf individuelle Wege im Sinne einer Optimierung des Gesamtverkehrssystems. Das Spektrum geht dabei von keiner Vernetzung der Fahrzeuge während der Fahrt bis hin zu einer Betriebsleitzentrale im MIV. Auf Basis dieses Grundsatzentscheides müssen die Anforderungen an die **Kommunikationsinfrastruktur** definiert werden, gesetzliche Grundlagen geschaffen werden, ein Betreibermodell gefunden werden und entsprechende vertragliche Bestimmungen ausgearbeitet werden. → **mittel- (Entscheid) bis langfristig (Umsetzung)**

Folienbericht

3a) Verkehrstechnik

Studie zum Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag,
Vertiefungsmodul, Grundlagen und Erkenntnisse
Definitive Fassung vom 04.04.18

Projektbeteiligte

Projektpartner

BaslerFonds
Schweizerischer Städteverband SSV
Stadt Zürich (TAZ, DAV)
Stadt Bern (Verkehrsplanung)
Bernmobil
Kanton St. Gallen (TBA)
Kanton Zürich (AFV)
Kanton Basel-Stadt (Amt für Mobilität)
Kanton Obwalden (Amt für Raumentwicklung und Verkehr)

Projektteam

Remo Fischer
Fabienne Perret
Lorenz Raymann
Bence Tasnády

EBP Schweiz AG
Mühlebachstrasse 11
8032 Zürich
Schweiz
Telefon +41 44 395 16 16
info@ebp.ch
www.ebp.ch

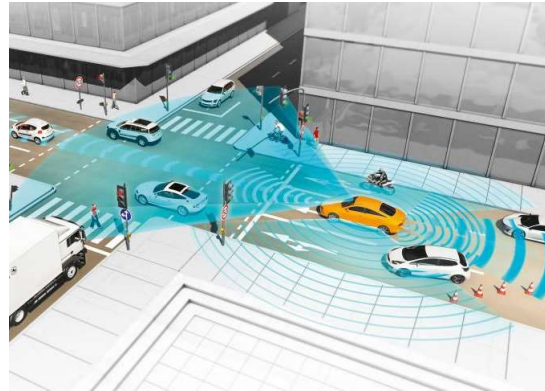
Inhalt

1. Ziele, Abgrenzung, Vorgehen	Seite 4
2. Leistungsfähigkeit Hochleistungsstrassen	Seite 10
2.1 statische Betrachtung	Seite 20
2.2 dynamische Betrachtung	Seite 24
2.3 Verkehrsfluss	Seite 31
3. Leistungsfähigkeit Stadtstrassen	Seite 37
4. Fazit Leistungsfähigkeit	Seite 51
5. Verkehrsmanagement	Seite 57
6. Folgen Infrastrukturbedarf	Seite 65
Literaturverzeichnis	Seite 69

1. Ziele, Abgrenzung, Vorgehen

1. Ziele des Vertiefungsmoduls

- Beschreibung des **Fahrverhaltens** automatisierter Strassenfahrzeuge
- Beschreibung der **Kapazitätswirkungen** des automatisierten Fahrens auf Strassen (aller Hierarchien) und Knoten
- Diskussion denkbarer Massnahmen im **Verkehrsmanagement**
- Folgerungen für veränderten **Infrastrukturbedarf**



Quelle: Continental, 2012

In der Phase B (Auswirkungsanalysen und Handlungsmöglichkeiten) der BaslerFonds-Studie zum automatisierten Fahren werden ausgewählte Fragestellungen vertieft. Das Modul 3a «Verkehrstechnik» nimmt sich dabei den oben aufgeführten **Zielen** an.

Seitens Industrie werden immer wieder Bilder transportiert, welche zahlreiche und grosse Möglichkeiten des automatisierten Fahrens beinhalten (siehe Abbildung). Im Modul sollen diese hinsichtlich der Auswirkungen auf die Kapazitäten der Strasseninfrastruktur sowie der Abhängigkeiten im Mischverkehr genauer untersucht und **differenziert diskutiert** werden. Bei den Folgen für den Infrastrukturbedarf wird unterschieden zwischen der Verkehrsträgerinfrastruktur Strasse (Leistungsfähigkeit) und der technischen Ausrüstung der Strasse (Anlagen des Verkehrsmanagements oder der Datenkommunikation).

1. Abgrenzung Kapazitätsbetrachtung

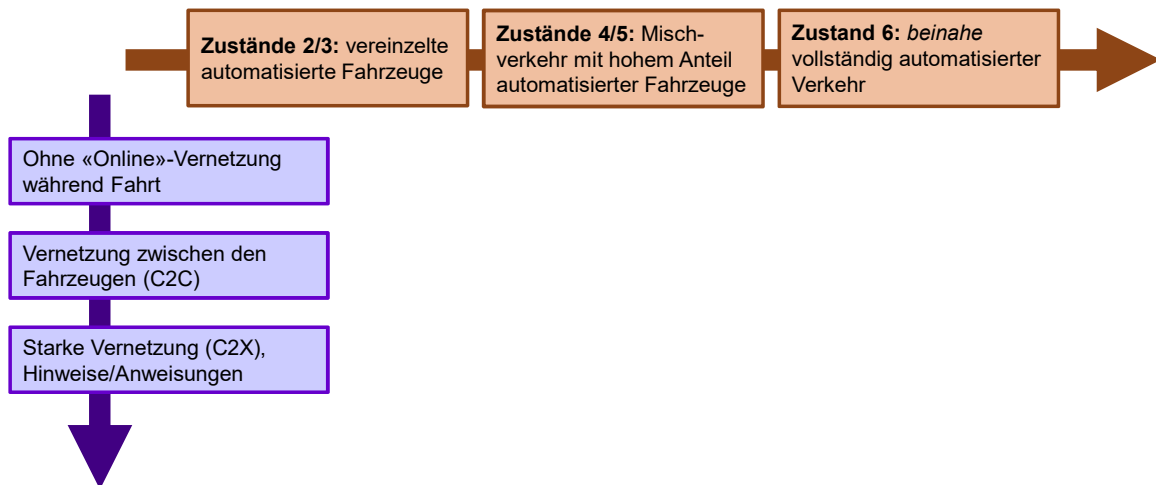
- **Reine Verkehrstechnische** Betrachtung der Kapazitäten von Infrastrukturelementen
- **Keine** Untersuchung zu **Nachfrageveränderungen** (Bsp. induzierter Verkehr) bzw. zur Wünschbarkeit solcher Effekte (→ wird in Gesamtstudie behandelt)



Quelle: autonomes-fahren.de, 2013

Die Untersuchung der **Kapazität** erfolgt in einer rein verkehrstechnischen Betrachtung von Infrastrukturelementen. Dabei steht die Frage im Zentrum, wie viele zusätzliche (oder abzuziehende) Fahrzeuge infolge der Automatisierung einen Querschnitt passieren können. **Rebound-Effekte** wie eine erhöhte Nachfrage (induzierter Verkehr) bzw. deren Wünschbarkeit werden nicht untersucht. Dieses Thema wird in der Gesamtstudie diskutiert.

1. Abgrenzung



Die Effekte automatisierter Strassenfahrzeuge sind stets von **Randbedingungen** abhängig. Für eine differenzierte Betrachtung der Wirkungen soll einerseits unterschieden werden, ob eine starke oder schwache **Vernetzung** zwischen den Fahrzeugen sowie mit der Infrastruktur angenommen wird. Andererseits sind unterschiedliche **Durchdringungen** der Gesamtflotte mit automatisierten Fahrzeugen zu berücksichtigen. Hierzu wird auf die unterschiedlichen Zustände gemäss den Arbeiten der Grundlagenphase A zurückgegriffen (Entwicklungspfad mit sechs Zuständen, vgl. Kapitel 3.3 im Grundlagenbericht).

1. Vorgehen

- Literaturrecherche (Fokus Fahrverhalten und Kapazitäten)
- Experteninterviews
- BK-Sitzung 1. Februar 2018: Diskussion, Einordnung und Ergänzung

Resultate aus der **Forschung** werden auf Basis von publizierten Artikeln und Präsentationen an Fachtagungen gesammelt und mit Fokus auf Fahrverhalten und Kapazitäten ausgewertet. Dazu stehen Unterlagen von verschiedenen Forschungsanstalten mit Schwerpunkt im deutschsprachigen Raum zur Verfügung. Ausgewählte **Experteninterviews** sollen helfen, die vorgenommene Auswertung zu überprüfen. An der Sitzung der **Begleitkommission** werden die Resultate kritisch hinterfragt und nach Bedarf ergänzt. Schliesslich werden Möglichkeiten und Rollen im Verkehrsmanagement diskutiert.

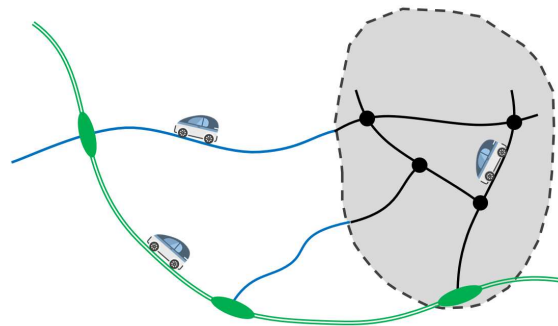
1. Massgebende Faktoren für Kapazitäten

Hochleistungsstrassen (HLS)

- Max. Verkehrsfluss auf freier Strecke
- Max. Verkehrsstärken in Verflechtungszonen und Anschlussbereichen
- **Zeitlücken, Stabilität Verkehrsfluss**
- **im Netz massgebend ist Abschnitt mit geringster Kapazität**

Stadtstrassen, Ortsdurchfahrten

- Kapazitäten an Knotenpunkten (v.a. LSA)
- **Zeitbedarfswerte im Knoten**



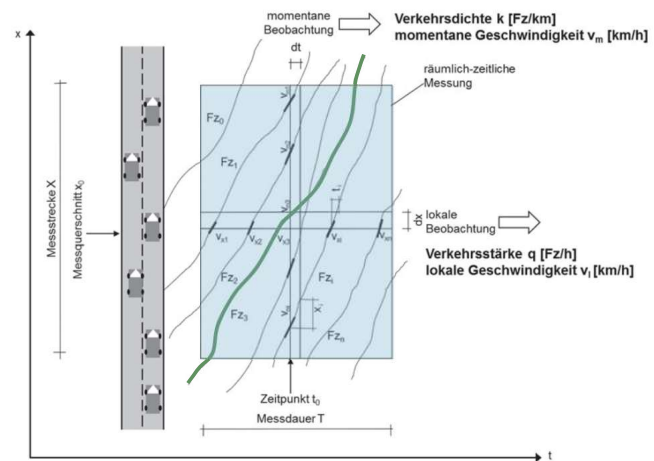
Bei der Kapazitätsbetrachtung von Netzelementen unterscheiden sich die Verkehrsräume grundsätzlich. Während auf **Hochleistungsstrassen** (Autobahnen, Autostrassen) vor allem Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen sowie die Stabilität des Verkehrsflusses im Vordergrund stehen, sind auf dem untergeordneten Netz bei **Stadtstrassen/Ortsdurchfahrten** vor allem Knoten leistungsbestimmend. Knoten mit hoher Nachfrage werden meist mit Lichtsignalanlagen (LSA) ausgerüstet, weshalb hier auf Zeitbedarfswerte in LSA-Knoten fokussiert wird. Im Folgenden werden zuerst Grundlagen für Hochleistungsstrassen und anschliessend für Stadtstrasse/Ortsdurchfahrten besprochen. Auf dieser Basis werden Folgerungen für das Gesamtnetz abgeleitet.

2. Leistungsfähigkeit von Hochleistungsstrassen (HLS)

2. Beschreibung Verkehrsablauf

Mikroskopisch: Einzelfahrzeug i
 x_i [m], t_i [s], v_i [km/h]

Makroskopisch: Verkehrsströme
 q [Fz/h], k [Fz/km], v_m [km/h]



Quelle: Friedrich, 2015

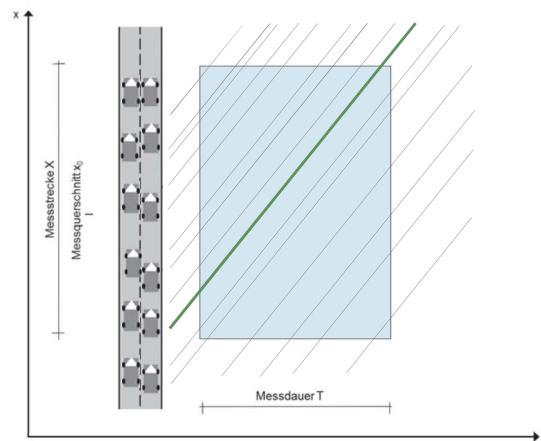
Der Verkehrsablauf kann auf unterschiedlichen Ebenen beschrieben werden. Der **mikroskopische** Beschrieb betrifft das Einzelfahrzeug mit seiner Position in Raum (x) und Zeit (t) sowie seiner Geschwindigkeit (v , entspricht der Neigung der Linien in der Graphik). Der **makroskopische** Beschrieb betrachtet eine Menge von Fahrzeugen und die Eigenschaften eines Verkehrsstroms über einen räumlich-zeitlichen Bereich. Zu den Eigenschaften gehören Verkehrsfluss (q), Verkehrsdichte (k) und mittlere Geschwindigkeit (v_m).

Die Abbildung zeigt mit der grünen Linie ein Einzelfahrzeug (mikroskopische Betrachtung) und mit dem blauen Bereich ein Verkehrsstrom (makroskopische Betrachtung). Dargestellt ist der konventionelle, nicht-automatisierte Verkehr.

2. Beschreibung Verkehrsablauf

Mikroskopisch: Einzelfahrzeug i
 x_i [m], t_i [s], v_i [km/h]

Makroskopisch: Verkehrsströme
 q [Fz/h], k [Fz/km], v_m [km/h]



Bei einer vollständigen Automatisierung wird davon ausgegangen, dass aufgrund von verringerten Abständen (Zeitlücken) im Hochlastbereich mehr Fahrzeuge einen räumlich-zeitlichen Bereich queren können (mehr Linien). Zudem könnten sich die Fahrlinien aufgrund von harmonisierten Geschwindigkeiten zu Parallelen entwickeln. Auf diese Effekte wird in der Folge eingegangen.

2. Definition Kapazität im Fundamentaldiagramm

Makroskopisch: Verkehrsströme

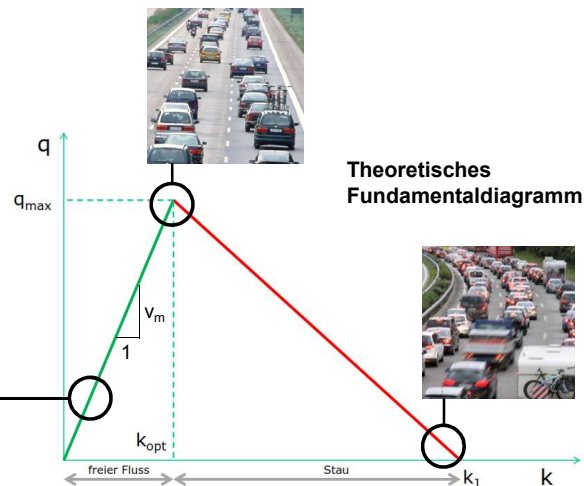
Verkehrsfluss q [Fz/h]

Verkehrsdichte k [Fz/km]

Mittlere Geschwindigkeit v_m [km/h]

Zusammenhang:

$$q = k * v$$



Die makroskopischen Größen sind über die Gleichung $q=v*k$ miteinander verknüpft. Sind zwei Größen bekannt, kann die dritte berechnet werden. Der Zusammenhang der drei Größen wird in sogenannten Fundamentaldiagrammen dargestellt. Die Abbildung zeigt das theoretische **Fundamentaldiagramm** von Verkehrsdichte k (x-Achse) und Verkehrsfluss q (y-Achse). Die Steigung einer Geraden an jeden Punkt auf der Kurve entspricht der mittleren Geschwindigkeit.

Es lassen sich zwei **verschiedene Zustände** bestimmen: Links (grüner Bereich) wird ein stabiler Zustand (freier Fluss) beschrieben, dabei nimmt mit zunehmender Verkehrsdichte auch der Verkehrsfluss linear zu. Rechts (roter Bereich) ist der instabile Zustand (Stau) aufgeführt, bei welchem mit zunehmender Verkehrsdichte der Verkehrsfluss abnimmt. Der maximale Verkehrsfluss (q_{max}) bei optimaler Dichte (k_{opt}) ist die Kapazität.

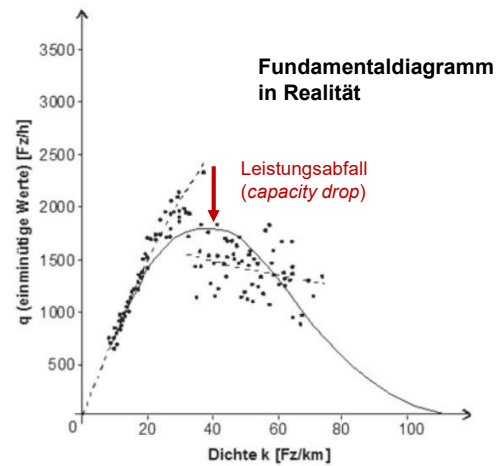
Mit zunehmendem Anteil des **Schwerverkehrs** verschiebt sich das Maximum nach links (geringere Fahrzeugdichte k , da Lastwagen mehr Platz benötigen) und nach unten (geringere Kapazität, da $q=k*v$).

2. Definition Kapazität im Fundamentaldiagramm

Makroskopisch: Verkehrsströme
 q [Fz/h], k [Fz/km], v_m [km/h]

Zusammenhang:

$$q = k * v$$



In der Abbildung wird ein Fundamentaldiagramm aus **Echtdaten** aufgeführt. Jeder Datenpunkt entspricht dem Verkehrszustand während einer Minute. Bei hohen Verkehrsstärken erfolgt – ausgelöst durch Störungen im Verkehrsablauf – der Übergang vom stabilen in den instabilen Zustand nicht kontinuierlich. Der Übergang ist mit einem deutlichen Rückgang der Verkehrsstärke verbunden. In der Abbildung wird dies durch die Lage der Datenpunkte beim bzw. unmittelbar nach dem Verkehrsflussmaximum deutlich.

Dieser **Leistungsabfall** (auch *capacity drop*) bzw. Rückgang des Verkehrsflusses ist auf den Abstand (Zeitlücke) zwischen den Fahrzeugen zurückzuführen. Fahrzeuglenkerinnen und Fahrzeuglenker verlassen Staubereiche mit höheren Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen, als sie im stabilen Zustand vor dem Zusammenbruch aufweisen.

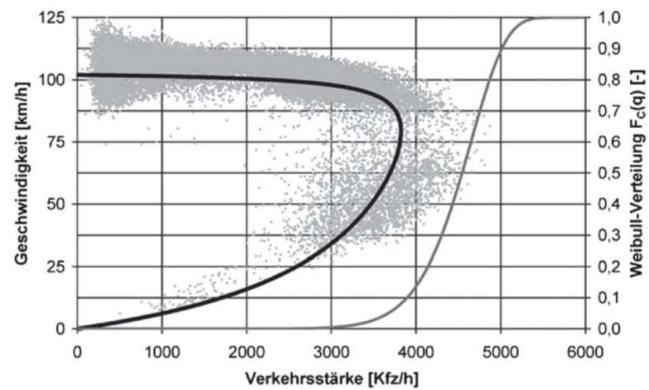
2. Definition Kapazität

Makroskopisch: Verkehrsströme

«**Grösste Verkehrsstärke**, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann.» (FGSV, 2015)

Kein exakter Wert, Zufallsgrösse

Erwartungswert: 50%-Quantil (Median)



Quelle: Friedrich, 2015

Gemäss Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS) wird die **Kapazität definiert** als die «Grösste Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann.» (FGSV, 2015)

In der Theorie kann mit dem Fundamentaldiagramm die Kapazität einfach bestimmt werden (maximaler Verkehrsfluss). In der Praxis ist die Kapazität jedoch **keine deterministische Grösse**. Dies wird in der Graphik für Daten einer zweistreifigen Autobahn abgebildet. Es gibt keinen exakten Wert, bei dem der Verkehrsfluss immer zusammenbricht, wenn er überschritten wird. Vielmehr ist die Kapazität eine Zufallsgrösse mit einer Streuung (beispielsweise durch Witterungseinflüsse oder individuellem Verhalten der Automobilisten). Als Erwartungswert der Kapazität wird der Median verwendet.

2. Von was ist die Kapazität abhängig?

Makroskopisch: Verkehrsströme
 q [Fz/h], k [Fz/km], v_m [km/h]

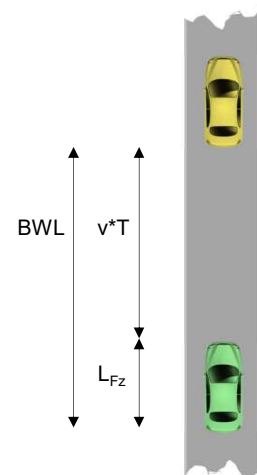
Abschätzung:

Bruttoweglücke BWL [m/Fz], Nettoweglücke (Fahrzeugabstand): $v * T$,
 Zeitlücke T [s]

$$\text{Fahrzeugdichte } k = \frac{1}{BWL} = \frac{1}{v * T + L_{FZ}}$$

$$\text{Kapazität } C = q_{max} = k * v = \frac{v}{v * T + L_{FZ}}$$

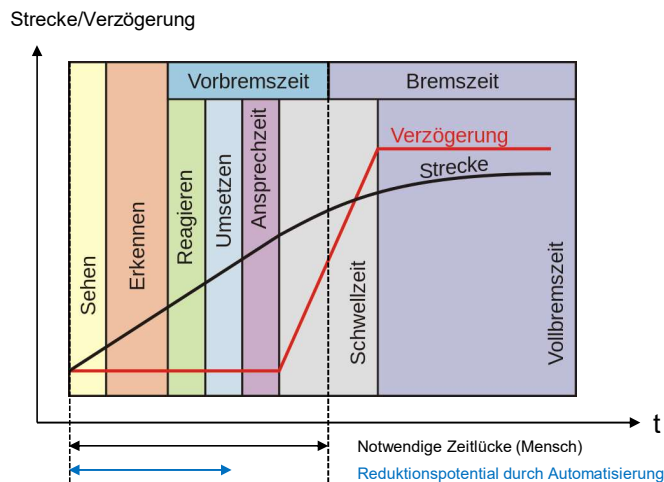
Die Kapazität ist statisch betrachtet vor allem von der **Zeitlücke** abhängig!



Die Kapazität ist vor allem von der **Zeitlücke** zwischen zwei Fahrzeugen abhängig. Dies zeigt die folgende Herleitung:

In der **makroskopisch-statischen Betrachtung** ist die Verkehrsdichte k [Fz/km] der Kehrwert der mittleren auftretenden Bruttoweglücke (Bruttoplatzbedarf pro Fahrzeug in [m/Fz]). Diese setzt sich zusammen aus der Länge eines Fahrzeuges (L_{FZ}) sowie dem Produkt aus Geschwindigkeit und Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen (entspricht der Nettoweglücke in [m]). Über die Gleichung $q=v*k$ kann dann die Kapazität (maximaler Verkehrsfluss) definiert werden. Bleiben Fahrzeuglänge und Geschwindigkeitsregime unverändert, hängt die Kapazität folglich vor allem von der **Zeitlücke** ab.

2. Zeitlücke: Zeitanteile des Anhaltewegs



Quelle: Wikipedia, 2018

Die notwendige **Zeitlücke** ist durch menschliche und technische Faktoren zum Anhalten bestimmt. So setzt sie sich zusammen aus Zeitanteilen in Bezug auf Sehen/Erkennen von Ereignissen, Reaktionszeit zur Verhaltensänderung, Fußumsetzzeit, technische Ansprechzeit (Betätigung Bremspedal bis Berührung Bremsbelag) sowie Teilen der technischen Schwelzeit (Entfaltung der maximalen Bremswirkung). Weiter sind Sicherheitszuschläge zu berücksichtigen. Durch den Entfall bzw. Reduktion von solchen Zeitanteilen können automatisierte Fahrzeuge eine massgebende Auswirkung auf die Zeitlücke und letztlich auf die Kapazität haben.

2. Zeitlücke T bei vom Menschen gesteuerten Fahrzeugen (HLS)

Realistische Grösse bei hohen Verkehrsstärken
(Friedrich, 2015):

$$T_m = 1.15 \text{ s}$$

Beispiel Autobahn in Deutschland (Wagner, 2015):

$$T_m = 1.4 \text{ s}$$

$$T_{max} = 1.1 \text{ s}$$

$$T_{Gesetz,min} = 0.9 \text{ s}$$

$$T_{Gesetz,Empfehlung} = 2.0 \text{ s}$$

$$T_{Gesetz,Faustregel} = 1.8 \text{ s} \text{ («halber Tacho»)}$$

Makroskopisch: Verkehrsströme

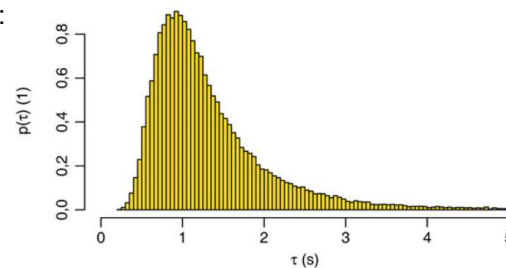


Abbildung: Zeitlückenverteilung auf der linken Spur der A3 in Deutschland im Bereich von 100 km/h, Quelle: Wagner, 2015

Die **Zeitlücke** bei konventionell gesteuerten Fahrzeugen ist keine deterministische Grösse, sondern weist in der Realität eine Streuung auf und folgt einer gewissen Verteilung.

(Friedrich, 2015) gibt auf der Basis von Untersuchungen für die Autobahn in Deutschland einen Mittelwert von 1.15 s an. (Wagner, 2015) führt eine Zeitlückenverteilung für einen Autobahnabschnitt in Deutschland gemäss obenstehender Abbildung auf (im Bereich von 100 km/h mit hohen Verkehrsstärken). Der Mittelwert liegt bei 1.4 s, der häufigste Wert ist 1.1 s. Gemäss Gesetz sollte im Strassenverkehr eine Zeitlücke von mindestens 0.9 s eingehalten werden, die Empfehlung beträgt jedoch rund 2.0 s. Die Faustregel, wonach der räumliche Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug der halbe «Tacho» in Meter betragen soll, entspricht einer Zeitlücke von 1.8 s.

2. Zeitlücke T bei vom Menschen gesteuerten Fahrzeugen (HLS)

Makroskopisch: Verkehrsströme

Werte **Schweiz** (Nettozeitlücke):

- Bsp. Deitingen A1 (2002-2005): zweistreifig, maximal 3'400 – 4'200 Fz/h bei 100 km/h
→ $T_m \approx 1.5 - 1.9 \text{ s}$
- Bsp. Baregg tunnel A1 (2000): zweistreifig, maximal 4'800 Fz/h bei 80 km/h
→ $T_m \approx 1.2 \text{ s}$
- Normierter Wert (SN 640 018a): zweistreifige Autobahn bei 100 km/h, 4'000 Fz/h
→ $T_m \approx 1.6 \text{ s}$

Die angegebenen **Zeitlücken** für Deutschland von (Wagner, 2015) können näherungsweise auch für die **Schweiz** verwendet werden. Verfügbare empirische Untersuchungen zu den Verkehrsstärken auf Schweizer Autobahnabschnitten (VSS 1995/023, SVI 2002/002) zeigen auf, dass die maximalen Verkehrsstärken pro Fahrstreifen im Bereich von 1'700 und 2'100 Fz/h liegen. Berechnet man daraus die Nettozeitlücke (zeitlicher Abstand zwischen der Rückseite eines voranfahrenden Fahrzeuges und der Vorderseite eines nachfolgenden Fahrzeuges), resultieren mittlere Werte von 1.5 – 1.9 s. Minimal wurden 1.2 s gemessen, was allerdings als sicherheitskritisch eingestuft wird. Für die Bemessung (SN 640 018a) werden Nettozeitlücken von rund 1.6 s eingesetzt, was geringfügig über dem Mittelwert von 1.4 s gemäss (Wagner, 2015) liegt.

2. Zeitlücke von automatisierten Fahrzeugen (HLS)

Friedrich, 2015:

$T_a = 0.5 \text{ s}$ «technisch realisierbar und aus Sicht der Verkehrsteilnehmer akzeptabel»

Wagner, 2015:

$T_a = 0.3 - 0.5 \text{ s}$ «von automatisierten Systemen erreichbar»

Fellendorf, 2017:

$T_a = 0.9 \text{ s}$ gemäss Einschätzung (Wert in Simulationen)

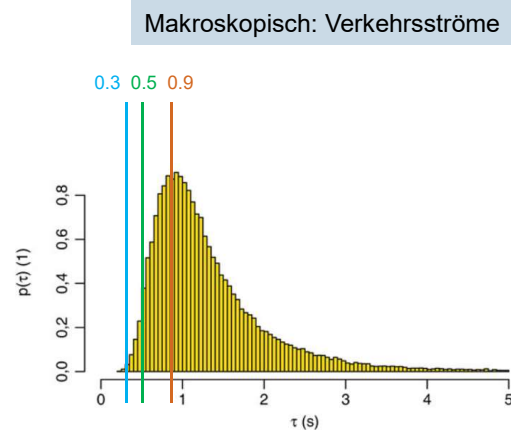


Abbildung: Zeitlückenverteilung auf der linken Spur der A3 in Deutschland im Bereich von 100 km/h, Quelle: Wagner, 2015

Auf die Frage nach dem **Einfluss der Automatisierung auf die Zeitlücke** gibt es verschiedene Antworten. (Friedrich, 2015) schätzt unter Berücksichtigung der technischen Realisierbarkeit und Akzeptanz der Verkehrsteilnehmenden für automatisierte Fahrzeuge eine Zeitlücke von 0.5 s ab. Diese tritt gemäss Beobachtungen (vgl. Zeitlückenverteilung) bereits heute in rund 20% der konventionell gesteuerten Fahrzeuge auf. (Wagner, 2015) setzt die Zeitlücke automatisierter Systeme auf 0.3 – 0.5 s an. Für die Simulation der Auswirkungen legt (Fellendorf, 2017) eine Zeitlücke von 0.9 s fest. Die erreichbare Zeitlücke der automatisierten Fahrzeuge unterscheidet sich je nach **Annahmen und Einschätzung** der Experten.

2.1 Folgen der verminderten Zeitlücke (statisch)

Makroskopisch: Verkehrsströme

Abschätzung gemäss (Friedrich, 2015):

$$l_{FZ} = 7.5 \text{ m} \quad (4.5 \text{ m Fahrzeuglänge} + 3.0 \text{ m Sicherheitsabstand im Stand})$$

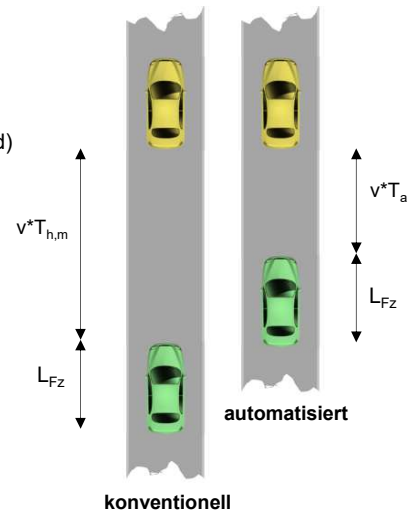
$$v = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$C = q_{\max} = k * v = \frac{v}{v * T + L_{FZ}}$$

$$T_{h,m} = 1.15 \text{ s} \rightarrow k = 30 \frac{\text{Fz}}{\text{km}}, C = 2'420 \frac{\text{Fz}}{\text{h}}$$

$$T_a = 0.5 \text{ s} \rightarrow k = 54 \frac{\text{Fz}}{\text{km}}, C = 4299 \frac{\text{Fz}}{\text{h}} (+78\%)$$

Ohne Schwerverkehr



Mit diesen Angaben zu den Zeitlücken kann eine statische **Abschätzung der Kapazitätspotentiale** durchgeführt werden. Diese gehen von einer vollständigen Durchdringung der Gesamtflotte mit automatisierten Fahrzeugen aus. Werden eine Fahrzeuglänge von 7.5 m, eine mittlere Geschwindigkeit von 80 km/h sowie eine durchschnittliche Zeitlücke konventionell gesteuerter Fahrzeuge ($h=human$) von 1.15 s angenommen, ergeben sich gemäss (Friedrich, 2015) Kapazitätsgewinne von 78%.

Werden eine Fahrzeuglänge von 6 m (entspricht der Rückstauberechnung bei LSA gemäss Schweizer Normen) und eine durchschnittliche Zeitlücke von 1.4 s (gemäss gezeigter Zeitlückenverteilung) verwendet, ergeben sich aus der statischen Abschätzung sogar Kapazitätssteigerungen von rund 117%.

Die Ausführungen der folgenden Folien haben in Bezug auf Fahrzeuglängen und Zeitlücken die Annahmen von (Friedrich, 2015) zur Basis.

2.1 Folgen der verminderten Zeitlücke

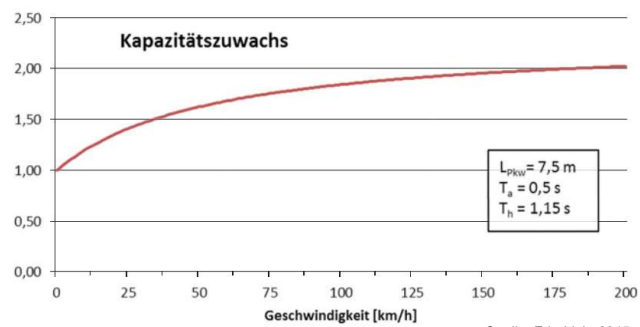
Makroskopisch: Verkehrsströme

Abschätzung:

Kapazitäten bei ausschliesslich automatisierter Fahrzeugflotte (für einen Fahrstreifen)

$$C = \frac{v}{v * T + L_{FZ}}$$

Abnehmende Kapazität mit zunehmendem LW-Anteil (l_{FZ} grösser)



Der Kapazitätseffekt ist gemäss statischer Formel von der **Geschwindigkeit** abhängig. Im Diagramm dargestellt wird der Kapazitätzuwachs infolge automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu einer Zeitlücke konventionell gesteuerter Fahrzeuge von 1.15 s. Ausgehend vom Stillstand werden die Kapazitäten mit zunehmender Geschwindigkeit erhöht, allerdings flacht die Kurve ab und erreicht einen Maximalwert.

Der **Lastwagen-Anteil** hat grundsätzlich eine abnehmende Wirkung auf die Kapazität (nicht abgebildet), da der mittlere Platzbedarf über alle Fahrzeuge zunimmt.

2.1 Folgen der verminderten Zeitlücke

Makroskopisch: Verkehrsströme

Abschätzung:

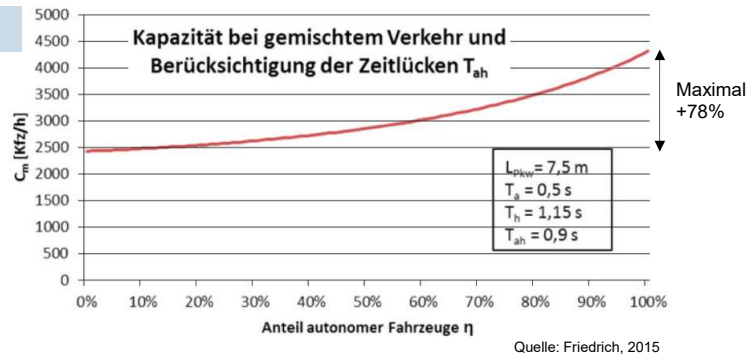
Kapazitäten nach Anteil von automatisierten Fahrzeugen (für einen Fahrstreifen)

Annahmen:

$$T_{aa} = 0.5 \text{ s}$$

$$T_{ah} = 0.9 \text{ s}$$

$$T_{hx} = 1.15 \text{ s}$$

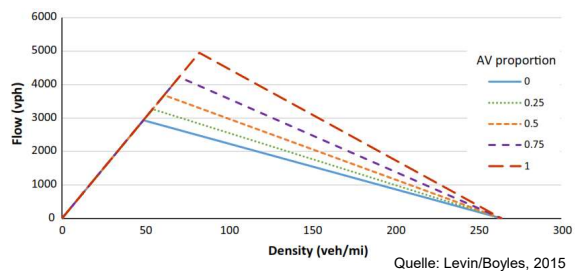
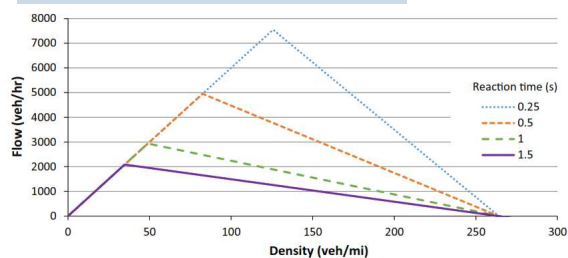


In den bisherigen Abschätzungen wurde stets eine vollständige Durchdringung der Fahrzeugflotte mit automatisierten Fahrzeugen angenommen. Kapazitätseffekte stellen sich jedoch auch mit einer **Teildurchdringung** ein. (Friedrich, 2015) nimmt für die oben dargestellte Abschätzung an, dass automatisierte Fahrzeuge untereinander eine Zeitlücke von 0.5 s (T_a) einhalten. Um menschliche Fahrer nicht zu bedrängen, wird die Zeitlücke zwischen automatisierten und (vorausfahrenden) herkömmlichen Fahrzeugen auf 0.9 s (T_{ah}) gesetzt. Menschliche Fahrerinnen und Fahrer halten eine mittlere Zeitlücke von 1.15 s ein. Mit diesen Annahmen steigt die Kapazität überproportional mit dem Anteil der automatisierten Fahrzeuge an.

Für diese Betrachtung wird angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge erkennen können, ob sie ein konventionelles oder ein ebenfalls automatisiertes Fahrzeug vor sich haben. Dies lässt sich beispielsweise mit einer entsprechenden Markierung an Fahrzeugen oder aber durch die Vernetzung (C2C) realisieren. Da beide Methoden an **Bedingungen** geknüpft sind (gute Sicht, keine Wettereinflüsse bzw. zuverlässige Datenübertragung) sind die berechneten Kapazitätseffekte theoretische Größen.

2.1 Theoretische Effekte im Fundamentaldiagramm

Makroskopisch: Verkehrsströme



Effekte der Automatisierung:

- Erhöhung des maximalen Verkehrsflusses
- Verschiebung der optimalen Fahrzeugdichte
- Konstant: freie Geschwindigkeit, Verkehrsdichte bei Stillstand

Beispiel Mischverkehr für:

- Zeitlücke automatisierte Fz: 0.5 s
- Zeitlücke konventionelle Fz: 1.0 s

Weiter stellt sich die Frage, wie sich die Wirkungen von automatisierten Fahrzeugen im zu Beginn gezeigten **Fundamentaldiagramm** niederschlagen. Der maximale Verkehrsfluss (=Kapazität) wird durch automatisierte Fahrzeuge erhöht, zudem wird eine grössere optimale Fahrzeugdichte erreicht. (Levin/Boyles, 2015) zeigt die oben dargestellten Diagramme unter Verwendung verschiedener Zeitlücken (hier *reaction time* genannt) und Flottenanteile automatisierter Fahrzeuge (hier *AV proportion* genannt). Die Steigung im stabilen Bereich (links) und damit die Geschwindigkeit des freien Flusses bleiben unverändert. Auch die maximale Verkehrsdichte (bei Stillstand) bleibt mit der Automatisierung gleich.

Die negative Steigung der Kurve im instabilen Bereich ist gemäss Verkehrsflusstheorie mit der **Ausbreitungsgeschwindigkeit von Staus** gleichzusetzen (rückwärtsgerichtete Stauwelle). Durch die erhöhte Kapazität ist auch die negative Steigung grösser. Dies bedeutet, dass mit der Automatisierung die Geschwindigkeit der Stauwellen zunimmt. Staus können sich folglich schneller ausbreiten, aber auch schneller wieder auflösen.

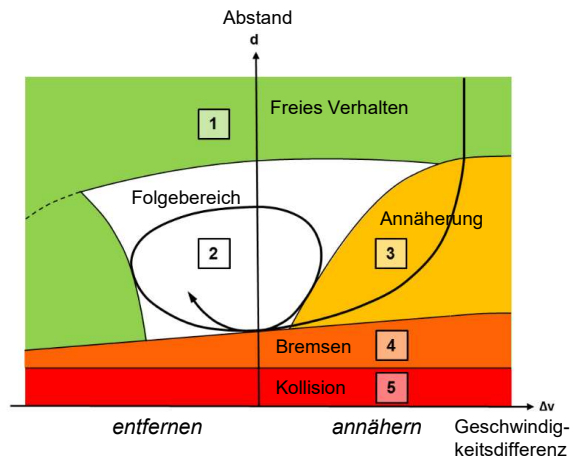
2.2 Dynamische Betrachtung

Mikroskopisch: Einzelfahrzeug

Gezeigte Berechnungen sind statische Abschätzungen.

Da Zeitlücken stochastische Größen sind, können die Effekte am besten mit **Simulationen** beschrieben werden.

Basis: **Fahrzeugfolgmodell** nach Wiedemann, ständiges leichtes Beschleunigen und Verzögern



Quelle: PTV, 2016

Die bisher quantifizierten Kapazitätseffekte basieren auf statischen Abschätzungen. Diese können beispielsweise zufallsverteilte Zeitlücken nicht abbilden. Um diesen Einfluss untersuchen zu können, sind **Simulationen** notwendig, die einer dynamischen Betrachtung entsprechen. Simulationen nehmen Gesetzmässigkeiten für das Fahrzeugverhalten an (auf mikroskopischer Ebene) und ermöglichen den Beschrieb der Folgen für gesamte Verkehrsströme (makroskopische Ebene).

Für die Zeitlücken zwischen Fahrzeugen bzw. die Längsführung ist dabei vor allem das **Fahrzeugfolgmodell** von Bedeutung. Dieses gibt an, wie ein Fahrzeug sein Verhalten in Abhängigkeit von Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz zum vorhergehenden Fahrzeug ändert. Meist wird dabei für das menschliche Verhalten das Fahrzeugfolgmodell von Wiedemann (siehe Abbildung) verwendet. Dieses legt die Parameter fest, mit denen das Einpendeln des Abstands simuliert wird (iterative Schleifen).

2.2 Dynamische Betrachtung

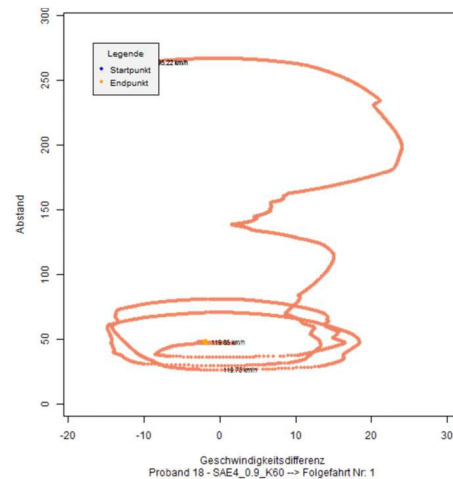
Mikroskopisch: Einzelfahrzeug

Viele der aktuellen Abstandregler funktionieren derzeit linear:

$$a = \dot{v} = \alpha * d + \beta * \Delta v$$

$$\text{Bsp. } \alpha = 0.05 \frac{1}{s^2}; \beta = 0.67 \frac{1}{s}$$

Vom Fahrer als angenehm empfunden



Heute sind teilautomatisierte Fahrzeuge mit **Abstandsregler** (ACC: *adaptive cruise control*) bereits verfügbar. Die Einstellungsparameter werden dabei von Fahrzeugherstellern meist nicht veröffentlicht. Gemäss (Wagner, 2015) funktionieren die heutigen Abstandsregler linear. Das bedeutet, dass sie Geschwindigkeitsänderungen proportional zum Abstand sowie proportional zur Geschwindigkeitsdifferenz zum vorhergehenden Fahrzeug vornehmen. Beispielwerte sind oben aufgeführt. Dabei ist insbesondere auch die Empfindung bzw. der Komfort von Fahrzeuginsassen zu berücksichtigen (Bsp. Ruckverhalten). Zum Intervall der Überprüfung bzw. des Eingreifens des Systems werden keine Angaben gemacht, aufgrund der Fahransprüche dürfte dieser aber deutlich unter einer Sekunde liegen.

Das Annährungsverhalten erfolgt für die **Simulationen** von (Fellendorf, 2017) gemäss oben aufgeführten Beispiel. Dabei zeigt sich, dass jeweils einige Iterationsschleifen vorgenommen werden müssen, bis das automatisierte Fahrzeug einen stabilen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug eingenommen hat. Im Vergleich mit dem menschlichen Verhalten sind mit dem angenommenen Längsführungsmodell automatisierter Systeme mehr Iterationen notwendig.

2.2 Dynamische Betrachtung

Makroskopisch: Verkehrsströme

Kolonnenstabilität = Keine Aufschaukelung von Störungen
Bsp. Geschwindigkeitsschwankungen des Führungsfahrzeugs

Inhalt von **Forschungsarbeiten** (Wagner, 2015)

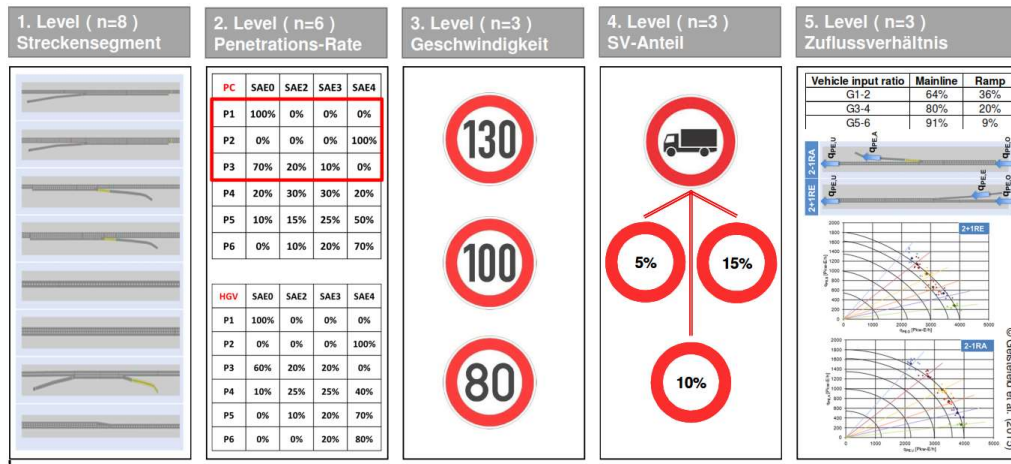
Nur für wenige Parameter von α und β der Fall

ACC aufgrund Kundenakzeptanz oft mit leichter Kolonneninstabilität konfiguriert

Ein weiteres Thema in der Verkehrsforschung ist die **Aufschaukelung von Störungen**. Dieses Phänomen entsteht, wenn beispielsweise Geschwindigkeitsänderung eines Führungsfahrzeugs in der Kolonne überproportional weitergegeben werden. Die Kolonnenstabilität ist gegeben, falls dieses Ereignis nicht auftritt. (Wagner, 2015) weist darauf hin, dass nur für wenige ACC-Parameter (Kombinationen von α und β) die Kolonnenstabilität einhalten ist. Aufgrund der Kundenakzeptanz werden ACC oft mit leichter Kolonneninstabilität konfiguriert.

2.2 Resultate Simulationen (TU Graz)

Makroskopisch: Verkehrsströme



(Fellendorf, 2017) hat im Rahmen eines **Forschungsprojektes in Österreich** die Kapazitätseffekte der Automatisierung für Autobahnen untersucht. Dabei wurde je ein Längs- und Querführungsmodell (Spurwechsel) entwickelt. Für unterschiedliche Kombinationen von Streckensegmenten, Flottenanteilen automatisierter Fahrzeuge, Geschwindigkeitsregimes, Schwerverkehrsanteilen und Zuflussverhältnissen bei Ein-/Ausfahrten wurden **Simulationen** durchgeführt und ausgewertet.

2.2 Resultate Simulationen (TU Graz)

Makroskopisch

Kapazitätsänderungen bei $T_a = 0.9 s$
 Erhöhung um max. 34% bei 100% Fahrzeugen auf Level 4
 Kapazitätssteigerung im HLS-Netz abhängig von Durchdringung 10-20%

Quelle: Fellendorf, 2017

04.04.2018 | Verkehrstechnik

3-streifig							
v	SV-Anteil	P1	P2	P3	P4	P5	P6
130 km/h	15%	5265	6674 (26.8%)	5734 (8.9%)	6134 (16.5%)	6528 (24.0%)	6675 (26.8%)
	10%	5283	6318 (19.6%)	5728 (8.4%)	6175 (16.9%)	6551 (24.0%)	6633 (25.5%)
	5%	5286	6538 (23.7%)	5742 (8.6%)	6189 (17.1%)	6505 (23.1%)	6525 (23.4%)
100 km/h	15%	5298	6477 (22.2%)	5725 (8.1%)	6053 (14.2%)	6438 (21.5%)	6646 (25.4%)
	10%	5322	6798 (27.7%)	5743 (7.9%)	6099 (14.6%)	6401 (20.3%)	6541 (22.9%)
	5%	5334	7137 (33.8%)	5779 (8.3%)	6147 (15.2%)	6440 (20.7%)	6458 (21.1%)
80 km/h	15%	5499	7007 (27.4%)	5922 (7.7%)	6144 (11.7%)	6530 (18.8%)	6747 (22.7%)
	10%	5504	7039 (27.9%)	5982 (8.7%)	6224 (13.1%)	6596 (19.8%)	6683 (21.4%)
	5%	5559	7283 (31.0%)	6006 (8.0%)	6211 (11.7%)	6605 (18.8%)	6656 (19.7%)

2+1RE Geschwindigkeit: 130 km/h SV-Anteil 10%							
Zuflussgruppe	MQ	P1	P2	P3	P4	P5	P6
G1-2	vor Einfahrt	2554	2453 (-4.0%)	2563 (0.4%)	2479 (-2.9%)	2453 (-4.0%)	2448 (-4.2%)
	Beginn Verflechtung	2338	2333 (-0.2%)	2482 (6.2%)	2506 (7.2%)	2472 (5.7%)	2472 (5.7%)
	Ende Verflechtung	3018	3296 (9.2%)	3290 (9.0%)	3684 (22.1%)	3709 (22.9%)	3410 (13.0%)
	nach Einfahrt	3221	3347 (3.9%)	3423 (6.3%)	3631 (12.7%)	3691 (14.6%)	3490 (8.4%)
G3-4	vor Einfahrt	2743	3006 (9.6%)	3244 (18.3%)	2970 (8.3%)	3000 (9.4%)	2988 (8.9%)
	Beginn Verflechtung	2652	3120 (17.6%)	2930 (10.5%)	2928 (10.4%)	2940 (10.9%)	3237 (22.1%)
	Ende Verflechtung	3155	3539 (12.2%)	3446 (9.2%)	3873 (22.8%)	3831 (21.4%)	3683 (16.7%)
	nach Einfahrt	3499	3627 (3.7%)	3670 (4.9%)	3852 (10.1%)	3894 (11.3%)	3778 (8.0%)
G5-6	vor Einfahrt	3083	3468 (12.5%)	3549 (15.1%)	3468 (12.5%)	3457 (12.1%)	3456 (12.1%)
	Beginn Verflechtung	3036	3662 (20.6%)	3462 (14.0%)	3456 (13.8%)	3481 (14.7%)	3493 (15.1%)
	Ende Verflechtung	3228	3877 (20.1%)	3584 (11.0%)	4004 (24.0%)	4139 (28.2%)	4060 (25.8%)
	nach Einfahrt	3490	3981 (14.1%)	3744 (7.3%)	4056 (16.2%)	4114 (17.9%)	4074 (16.7%)

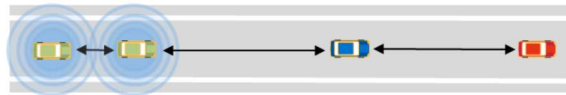
Unter der Annahme einer Folgezeitlücke der automatisierten Fahrzeuge von 0.9 s werden die oben aufgeführten Kapazitätseffekte im Vergleich zum Basis-Zustand ohne Automatisierung (P1) erreicht. Für das Szenario mit vollständiger Automatisierung (P2) werden in Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Segment und Zuflussverhältnisse **Kapazitätssteigerungen im Bereich von 0-30%** erreicht. Maximal resultiert eine Kapazitätssteigerung von rund 34% auf einer dreistreifigen Strecke ohne Knoteneinfluss und mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h. Für die Szenarien mit geringerer Durchdringung (P3-P6) sind die Effekte wie erwartet geringer.

In den Simulationen wird somit nicht die gleiche Steigerung der Leistungsfähigkeit wie in der statischen Abschätzung nach (Friedrich, 2015) erreicht. Gründe hierfür sind vor allem die unterschiedlichen Annahmen zu den Zeitlücken, die Berücksichtigung des Schwerverkehrs sowie die Konfiguration von Verflechtungszonen (statische Abschätzung nach Friedrich in Bezug auf freie Strecke).

2.2 Resultate Simulationen (TU München)

Mikroskopisch: Einzelfahrzeug

Vehicle type	Longitudinal control	Lateral control	V2V	Headway [s]	Figure
Conventional Vehicle	driver	driver	No	1.1 (with variation)	
Partially Automated Vehicle (PAV)	system	driver	No	1.8	
Highly Automated Vehicle (HAV)	system	system	No	1.8	
Connected Automated Vehicle (CAV)	system	system	Yes	0.9 (when following another CAV)	
Extreme Automated Vehicle (CAV*)	system	system	Yes	0.5	

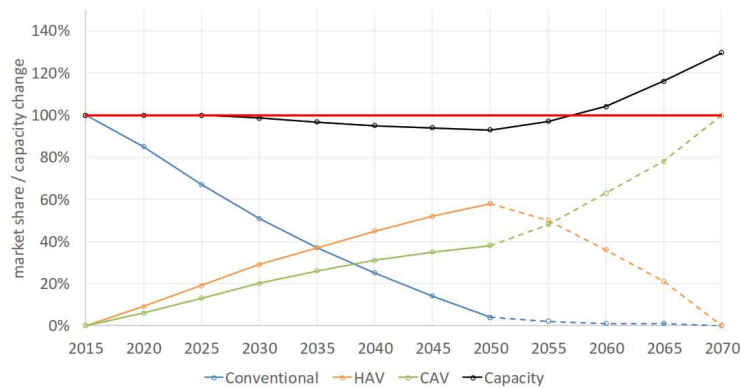


Quelle: Motamedidehkordi/Hoffmann, 2017

Für das Autobahnnetzwerk in Deutschland wurden **Simulationsergebnisse** von (Motamedidehkordi/Hoffmann, 2017) publiziert. Dabei werden zu Beginn einige Annahmen in Bezug auf die Zeitlücken (hier: *headways*) getroffen. Mit teilautomatisierten ACC-Systemen wird gemäss Tests heute eine mittlere Folgezeitlücke in der Größenordnung von 1.4 s erreicht. Tiefere Werte (Bsp. 0.9 s oder 0.5 s) können mit den aktuellen Fahrassistenzsystemen nicht eingestellt werden. Hintergrund dürften sowohl rechtliche und sicherheitstechnische Überlegungen der Hersteller sein.

Für die Simulation wird daher angenommen, dass teil- und hochautomatisierte Systeme eine **Zeitlücke von 1.8 s** einhalten, dies entspricht den gesetzlichen Vorgaben bzw. Faustregeln. Im Vergleich mit nicht-automatisierten Fahrzeugen liegt dies deutlich über deren empirisch festgelegten Zeitlücken von 1.1 s und führt daher zu einer Verringerung der Kapazität. Erst mit vernetzten und «extrem» konfigurierten automatisierten Fahrzeugen wird gemäss Annahmen die Zeitlücke verringert und damit die Kapazität erhöht.

2.2 Resultate Simulationen (TU München)



Makroskopisch:
Verkehrsströme

Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf die Kapazitäten von Autobahnen in Deutschland

Quelle: Motamedidehkordi/Hoffmann, 2017

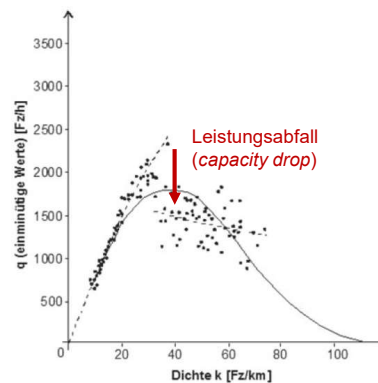
Die Kapazitätswirkungen der Untersuchung von (Motamedidehkordi/Hoffmann, 2017) werden im obenstehenden Diagramm für das **Autobahnnetzwerk in Deutschland** aufgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Strassensegmente, Belastungsverhältnisse und SV-Anteile berücksichtigt. In Abhängigkeit der Durchdringung von hochautomatisierten (HAV) und vernetzten automatisierten (CAV) Fahrzeugen in der Gesamtflotte wird bis 2050 die Kapazität um bis zu 7% reduziert. Diese Reduktion ist eine direkte Folge der Annahmen zu den (hohen) Zeitlücken von HAV. Erst mit einem hohen Anteil an CAV werden Kapazitätsgewinne erreicht, maximal sind gemäss dieser Studie 30% bei einer vollständig vernetzten und automatisierten Gesamtflotte möglich.

2.3 Stabilität Verkehrsfluss

Makroskopisch: Verkehrsströme

Durch die Automatisierung entstehen folgende Potentiale bzgl. **Verkehrsfluss**:

- Geringere Streuung der Kapazitäten, da einheitlicheres Verhalten als konventionelle Fahrzeuge
- Reduktion des Leistungsabfalls im Hochlastbereich (unveränderte Zeitlücken beim Verlassen der Staufrent)



Quelle: Friedrich, 2015

Betrachtet man die Kapazität als zufallsverteilte Grösse, wird erwartet (Friedrich, 2015), dass Verkehrssituationen mit grossem Anteil automatisierter Fahrzeuge durch den Entfall von menschlichen Unterschieden in der Reaktion und Steuerung eine **geringere Streuung** des maximal erreichbaren Verkehrsfluss (=Kapazität) aufweisen können. Damit liessen sich zuverlässigere Aussagen über die Grenzen der Leistungsfähigkeit machen.

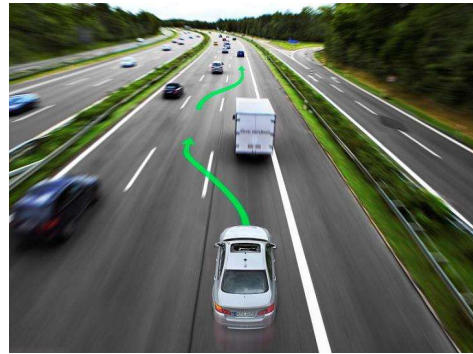
Es wird erwartet, dass automatisierte Fahrzeuge auch bei Störungen ihre Zeitlücken eher konstant halten können und sich somit massgeblich vom menschlichen Verhalten unterscheiden. Dies würde folglich zu einer **Reduktion des Leistungsabfalls** im Hochlastbereich (*capacity drop*) führen oder – bei vollständiger Automatisierung – gar eine Verhinderung desselben ermöglichen.

2.3 Stabilität Verkehrsfluss: Fahrstreifenwechselverhalten

Mikroskopisch: Einzelfahrzeug

Unterschiede zu konventionellen Fahrzeugen, Simulationsparameter (Kruse, 2017):

- Sofortiger Wechsel auf rechten Fahrstreifen nach Überholvorgang
- Kooperatives Verhalten: kleinere Lücken für Fahrstreifenwechsel nutzen (sofern vernetzt)



Quelle: Focus, 2013

(Kruse, 2017) führt Verhaltensänderungen bei Fahrstreifenwechsel (**Querführung**) automatisierter Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen auf. Dazu gehören schnellere Wechsel auf den rechten Fahrstreifen nach einem Überholvorgang sowie die Nutzung kleinerer Zeitlücken für den Fahrstreifenwechsel. Letzteres bedingt jedoch eine erhöhte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen.

2.3 Stabilität Verkehrsfluss: Resultate Simulation (TU München)

Makroskopisch: Verkehrsströme

Folgen der Automatisierung (Kruse, 2017):

- Harmonisierung der Geschwindigkeiten, weniger Fahrstreifenwechsel (insbesondere in Verflechtungsbereichen)
- Einpendeln der Geschwindigkeiten an Kapazitätsgrenze auf langsamste Verkehrsteilnehmende
- Reduktion Verkehrszusammenbrüche

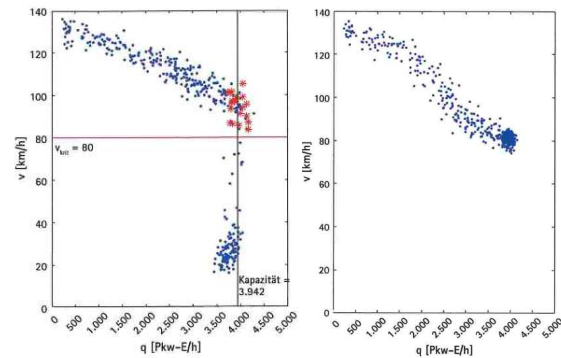


Abbildung: Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm, nicht-automatisierte (links) bzw. automatisierte (rechts) Fahrzeuge, Quelle: Kruse, 2017

(Kruse, 2017) beschreibt die Effekte der Simulationsparameter auf den **Verkehrsfluss**. Automatisierte Fahrzeuge führen zu einem einheitlicheren Geschwindigkeitsverhalten. Die Folge davon sind weniger Fahrstreifenwechsel, was insbesondere in Verflechtungsbereichen positive Wirkungen auf die Kapazität hat. An der Kapazitätsgrenze pendelt sich die Geschwindigkeit auf die langsamsten Verkehrsteilnehmenden im Netz ein (Lastwagen).

In der Simulation konnte nachgewiesen werden, dass die **Harmonisierung der Geschwindigkeit** zu einer Reduktion von Verkehrszusammenbrüchen führt. Dies wird im Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm sichtbar, wo mit der Automatisierung (rechts) instabile Zustände mit tiefer Geschwindigkeit fehlen. Der Verkehrszusammenbruch verlagert sich jedoch in andere Bereiche des Netzes.

2. Zusammenfassung: Hochleistungsstrassen (1/2)

Makroskopisch: Verkehrsströme

Kapazitäten HLS-Netz:

- Friedrich, 2015 (statisch): Kapazitätserhöhung um ca. **80%** Ohne Schwerverkehr
- Fellendorf, 2017 (Simulation): Kapazitätserhöhung um **0-30%** Mit Schwerverkehr
- Motamedidehkordi/Hoffmann, 2017 (Simulation): Reduktion um ca. **7%** (bis 2050), danach Erhöhung um max. **30%** Mit Schwerverkehr

Vergleich zur Kapazitätserhöhung durch **zusätzliche Fahrstreifen** (SN 640 018a):

- zweistreifig: 4'000 Fz/h
- dreistreifig: 5'800 Fz/h **(+45%)**

SV-Anteil unter 5%, Steigung unter 2%

Die ausgewählte Literatur lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Kapazitätssteigerungen mit automatisierten Fahrzeugen sind nur möglich, wenn die **Folgezeitlücken** im Mittel reduziert werden können. Experten gehen dabei von Reduktionen auf 0.5-0.9 s aus. Gemäss Simulationsresultaten mit Berücksichtigung von tatsächlich auftretenden Verkehrsbedingungen (inkl. Schwerverkehr) werden Kapazitätssteigerungen von bis zu 30% bei vollständig automatisierter Gesamtflotte angegeben. Auch mit teilweiser Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen werden Kapazitätseffekte erzielt, diese nehmen jedoch überproportional mit dem Anteil automatisierter Fahrzeuge zu. Werden die Systeme aufgrund von Sicherheitsüberlegungen mit höheren Zeitlücken konfiguriert, besteht die Gefahr einer (vorläufigen) Leistungsreduktion.

Zum **Vergleich** der Leistungssteigerung kann ein Spurausbau herbeigezogen werden. Gemäss SN 640 018a ist die Leistungsfähigkeit einer dreistreifigen gegenüber einer zweistreifigen Autobahn rund 45% höher. Während statische Abschätzungen darüber liegen, wird diese Leistungs Zunahme in Simulationen unter Annahme von einer Zeitlücke von 0.9 s nicht erreicht (Fellendorf, 2017).

2. Zusammenfassung: Hochleistungsstrassen (2/2)

Makroskopisch: Verkehrsströme

Weitere Wirkungen von automatisierten Fahrzeugen

- Verändertes Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselverhalten
- Harmonisierung Geschwindigkeit, Höhere Stabilität des Verkehrsflusses
- Reduktion Leistungsabfall (*capacity drop*)

Weiter dürften unter der Berücksichtigung eines veränderten Fahrzeugfolge- (Längsführung) und Fahrstreifenwechselverhaltens (Querführung) harmonisierte Geschwindigkeiten und eine höhere **Stabilität des Verkehrsflusses** erreicht werden. Zudem besteht das Potential, durch das konstante Einhalten von Zeitlücken Leistungsabfälle an der Kapazitätsgrenze abzumindern. Die **Vernetzung** der Fahrzeuge wirkt sich gemäss Literatur positiv auf die Effekte aus.

3. Leistungsfähigkeit Stadtstrassen/Ortsdurchfahrten

Wie eingangs erläutert, sind auf dem untergeordneten Netz bei **Stadtstrassen/Ortsdurchfahrten** vor allem Knoten leistungsbestimmend. Knoten mit hoher Nachfrage werden meist mit Lichtsignalanlagen (LSA) ausgerüstet, weshalb hier auf Zeitbedarfswerte in LSA-Knoten fokussiert wird.

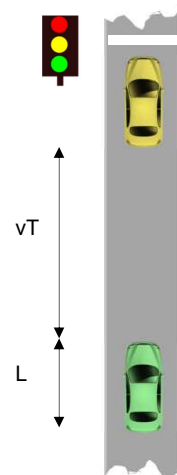
3. Lichtsignalanlage (LSA): Zusammenhänge

Makroskopisch: Verkehrsströme

Standardbedingungen, Räumen aus dem Stand:
Antizipation des Anfahrzeitpunktes durch Beobachtung

$$\text{Zeitbedarf } t_b = T_h + \frac{L}{v} = 0.6 \text{ s} + \frac{7.5 \text{ m}}{22.5 \text{ km/h}} = 1.8 \text{ s}$$

$$q_s = \frac{v}{vT_h + L} = \frac{1}{t_b} = 2'000 \text{ Fz/h}$$



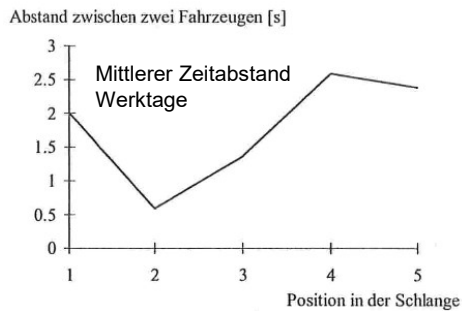
Quelle: Friedrich, 2015

Die **Kapazität von Lichtsignalanlagen (LSA)** ist bei einem optimierten Knotenlayout sowie einem optimierten Signalprogramm vor allem von der Sättigungsverkehrsstärke abhängig, also dem maximalen Verkehrsfluss, mit dem die Knotenzufahrten geräumt werden. Die Anfahrt erfolgt dabei regelmässig aus dem Stand.

Bei **Standardbedingungen** bedürfen konventionelle Fahrzeuge je rund 1.8 s. Dieser Wert setzt sich zusammen aus der Zeitlücke (Reaktionszeit bei Antizipation ca. 0.6 s, dh. ohne weitere Verzögerungen) und dem Verhältnis aus Fahrzeuglänge und durchschnittlicher Räumgeschwindigkeit. Die Sättigungsverkehrsstärke erreicht dabei einen Wert von rund 2'000 Fz/h. Massgebend für die Sättigungsverkehrsstärke sind dabei insbesondere die Folgezeitlücke und die Räumgeschwindigkeit.

3. Lichtsignalanlage (LSA): Heutige Zeitlücken

Mikroskopisch: Einzelfahrzeug



Untersuchung am Knoten Hagenholz-/Binzmühle-/Thurgauerstrasse in Zürich (1996):

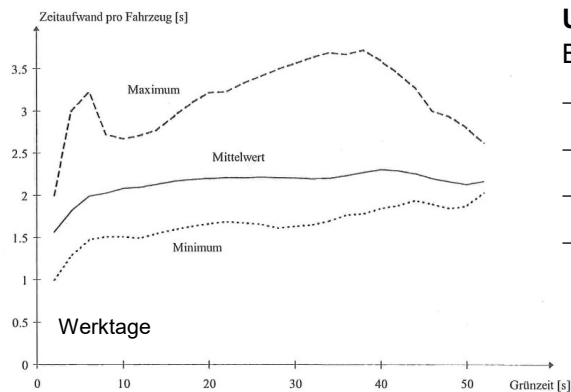
- Zeitabstand 1. Fahrzeug: 2.0 s Reaktionszeit
- Zeitabstand 2. Fahrzeug: ca. 0.6 s
- Anstieg bis zum 4. Fahrzeug
- Zeitabstand 5. – 10. Fahrzeug: ca. 2.2 s
- anschliessend deutliche Zunahme

Quelle: ATC, 2012

Empirische Untersuchungen an Detektoren vor einer LSA in der Schweiz zeigen (ATC, 2012), dass der Zeitabstand pro Fahrzeug stark von der Position in der Warteschlange abhängig ist. Das erste Fahrzeug benötigt rund 2.0 s Reaktionszeit, um in den Knoten einzufahren. Durch Antizipation des Fahrers im 2. Fahrzeug (Fahrer sieht LSA und wird nur durch 1. Fahrzeug aufgehalten) wird ein minimaler Zeitabstand von 0.6 s erreicht. Für die meisten Fahrzeuge beträgt der Zeitabstand rund 2.2 s und liegt damit im Bereich der Standardannahmen (Sättigungsfluss von 1'640 Fz/h). Bei besonders grossen Rückstaus nimmt der zeitliche Abstand ab dem 11. Fahrzeug deutlich zu.

3. Lichtsignalanlage (LSA): Heutige Zeitlücken

Makroskopisch: Verkehrsströme



Quelle: ATC, 2012

Untersuchung am Knoten Hagenholz-/ Binzmühle-/ Thurgauerstrasse in Zürich (1996):

- Zeitbedarf ist von Grünzeitfenster abhängig
- Minimalgrün: ca. 1.8 s (Mittelwert)
- Höhere Grünzeitfenster: ca. 2.1 s (Mittelwert)
- Streuung hoch bei 20 – 40 s Grünzeit

In der gleichen **empirischen Untersuchung** (ATC, 2012) wurden zudem die für die Knotenkapazitäten massgebenden Zeitbedarfswerte (mittlere Zeitabstände über alle Fahrzeuge der Kolonne) sowie deren Streuung untersucht. Dabei zeigt sich, dass diese von der Länge der Grünzeitfenster abhängen. Für kurze Grünzeiten (Minimalgrünzeit in der Schweiz heute: 4.0 s) tritt im Mittel ein Zeitbedarfswert von rund 1.8 s auf, da schnell reagiert und beschleunigt wird. Für längere Grünzeiten überschreitet der Zeitbedarfswert 2.0 s. Minimal werden Zeitbedarfswerte von 1.0 s erreicht. Die Streuung der Zeitbedarfswerte ist für Grünzeitfenster von 20-40 s besonders hoch.

Die tatsächlichen **Sättigungsverkehrsstärken** für längere Grünzeiten (1'715 Fz/h bei Zeitbedarf von 2.1 s) dürften somit etwas tiefer liegen als die standardmässig verwendeten 2'000 Fz/h bei 1.8 s (Friedrich, 2015). Für kurze Grünzeitfenster sind sie zutreffend.

3. LSA: Effekte auf Zeitlücken

Makroskopisch: Verkehrsströme

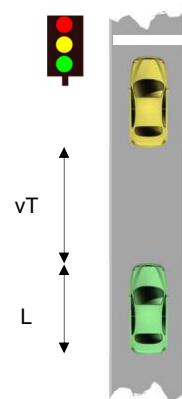
Durch automatisierte Fahrzeuge verändern sich die **Zeitlücken**, durch Mischverkehr im dichten und langsamen Stadtverkehr sollten folgende Werte nicht unterschritten werden (Friedrich, 2015):

$$T_{aa} = 0.3 \text{ s}; T_{ah} = 0.6 \text{ s}; T_{hx} = 0.6 \text{ s}$$

Bei vollständig automatisiertem Betrieb:

$$\text{Zeitbedarf } t_b = T_h + \frac{L}{v} = 0.3 \text{ s} + \frac{7.5 \text{ m}}{22.5 \text{ km/h}} = 1.5 \text{ s}$$

$$q_s = \frac{v}{vT_h + L} = \frac{22.5 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{22.5 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 0.3 \text{ s} + 7.5 \text{ m}} = 2'400 \text{ Fz/h (+20\%)}$$



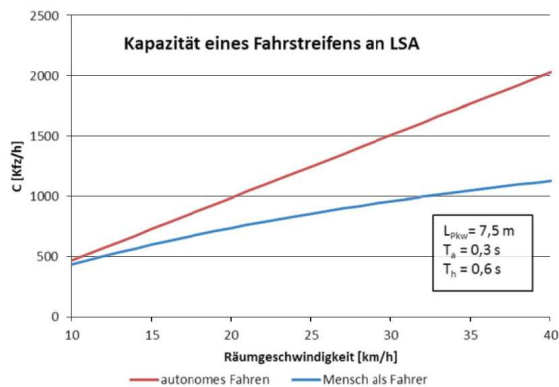
Quelle: Friedrich, 2015

Für **automatisierte Fahrzeuge** nimmt (Friedrich, 2015) an, dass die Reaktionszeit bzw. der Sicherheitsabstand im dichten Stadtverkehr zwischen automatisierten Fahrzeugen (T_{aa}) auf 0.3 s anzusetzen ist. Um menschliche Fahrer nicht zu bedrängen, soll die Zeitlücke nicht reduziert werden, wenn kein automatisiertes Fahrzeug vorausfährt. Dies bedingt das Erkennen von automatisierten bzw. nicht-automatisierten Fahrzeugen (über Markierung oder Vernetzung). Bei vollständig automatisierter Gesamtflotte könnte gemäss statischer Abschätzung die Sättigungsverkehrsstärke um rund 20% erhöht werden. Der mittlere Zeitbedarfswert pro Fahrzeug beträgt dann 1.5 s.

Mit einer Zeitlücke von 0.3 s nimmt (Friedrich, 2015) für Knotenbetrachtungen einen tieferen Wert an als auf Hochleistungsstrassen (0.5 s). Dies geht auf den heute bei Antizipation auftretenden und bereits tiefen Wert von 0.6 s zurück. Damit zeigt sich, dass im **Stadtverkehr** geringere Zeitlücken akzeptiert sind. Es bedeutet auch, dass im **Stadtverkehr** die Potentiale bei der Reduktion der Zeitlücke geringer sind als auf den Hochleistungsstrassen.

3. LSA: Effekt der Räumgeschwindigkeit

Makroskopisch: Verkehrsströme



Grosser Einfluss der Geschwindigkeit, zügigeres Anfahren mit weiterem positiven Effekt auf Kapazität.

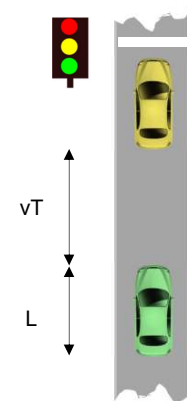
Bei vollständig automatisierter Gesamtflotte nehmen die Kapazitätssteigerungen mit zunehmender **Räumgeschwindigkeit** zu. Dies wird in der Abbildung für Zeitlücken von 0.3 s für automatisierte Fahrzeuge gegenüber 0.6 s von konventionellen Fahrzeugen aufgeführt. Gelingt es also, neben den Zeitlücken auch die Räumgeschwindigkeit (dh. letztlich die Beschleunigung) zu erhöhen, können die Effekte weiter gesteigert werden. (Friedrich, 2015) gibt hierzu Gewinne von insgesamt rund 40% an.

3. LSA: Effekte auf Zeitlücken

Makroskopisch: Verkehrsströme

Erwartete Effekte der automatisierten Fahrzeuge:

- Verringerter **Zeitbedarf** pro Fahrzeug
- **Harmonisierung** der Zeitlücken, Reduktion Streuung
- Verhinderung **Pulks** (bei vollständiger Durchdringung)
- Unverzögertes **Anfahren**
- Erhöhte **Räumgeschwindigkeit**



Werden die **erwarteten Wirkungen** automatisierter Fahrzeuge an LSA-Knoten gesammelt und dem heutigen Verhalten menschlicher Fahrer gegenübergestellt (vgl. Untersuchung in Zürich), ergibt sich folgendes Bild:

- Der **Zeitbedarf** pro Fahrzeug wird reduziert. In der Folge nehmen Sättigungsströme sowie Knotenkapazitäten zu.
- Die Ausdehnung der Folgezeitlücken wird durch automatisierte Fahrzeuge harmonisiert. Je höher die Durchdringung automatisierter Fahrzeuge an der Gesamtflotte, desto geringer ist die **Streuung** der Zeitabstände.
- Bei vollständig automatisiertem Verkehr werden einheitliche Zeitabstände eingehalten, die Bildung von **Fahrzeugpulks** beim Auflösung von Kolonnen auf den Knotenzufahrten kann vermieden werden.
- Bei automatisierten Fahrzeugen dürften Verzögerungen infolge des menschlichen **Anfahrens** entfallen. Kolonnen dürften sich (bei vollständiger Automatisierung) gleichzeitig in Gang setzen. Durch Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur (C2I) wird dieses Verhalten begünstigt (Übermittlung Zeitpunkt der Freigabe).
- Durch die Ausnützung der maximalen Beschleunigung dürfte die **Räumgeschwindigkeit** gegenüber menschlichen Fahrerinnen und Fahrern zunehmen. Dies reduziert zusätzlich den Zeitbedarfswert und erhöhte die Knotenleistungsfähigkeit.

3. LSA mit Festzeitsteuerung (Resultate Simulation)

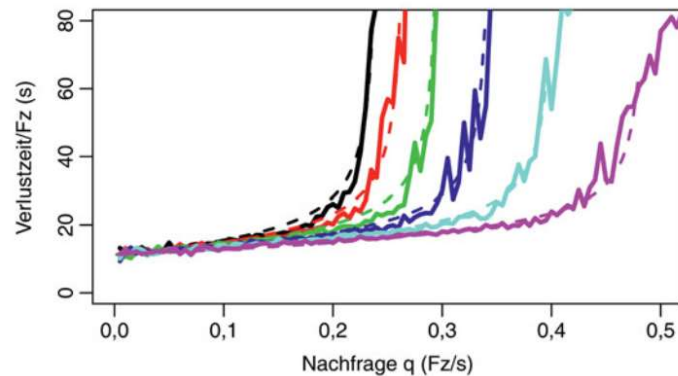
Makroskopisch: Verkehrsströme

Resultate Simulation der Verlustzeiten mit zunehmender Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen (schwarz: 0%, violett: 100%).

Annahmen:

$$T_a = 0.5 \text{ s}$$

$$T_h = 1.5 \text{ s}$$



Quelle: Wagner, 2015

(Wagner, 2015) untersuchte die **Leistungseffekte auf LSA** auf der Basis von **Simulationen**. Die Zeitlücken werden konservativer als bei (Friedrich, 2015) zu 0.5 s bei automatisierten Fahrzeugen und 1.5 s bei menschlichen Fahrerinnen und Fahrern angenommen. Die Nachfrage wird als zufallsverteilte Grösse beschrieben, die Signalsteuerung erfolgt (hier) nicht-adaptiv. Die resultierenden Verlustzeiten in Abhängigkeit der Nachfrage werden oben aufgeführt. Es zeigt sich, dass vom konventionellem Fahren (schwarz) zur vollständigen Automatisierung (violett) die Verlustzeiten bei gleicher Nachfrage schrittweise gesenkt werden können bzw. die Nachfrage bei gleichbleibenden Verlustzeiten erhöht werden kann. Mit dieser erhöhten Leistungsfähigkeit liessen sich beispielsweise die Grünzeiten neu verteilen oder die Umlaufzeiten reduzieren.

3. LSA mit adaptiver Steuerung (Resultate Simulation)

Makroskopisch: Verkehrsströme

Veränderung der Freigabezeiten (5-40 s), Optimierung Umlaufzeit

Resultate für sinus-förmig schwankende Verkehrsströme, in Abhängigkeit der Durchdringung (schwarz: 0%, hellblau: 100%).

Annahmen:

$$T_a = 0.5 \text{ s}$$

$$T_h = 1.5 \text{ s}$$

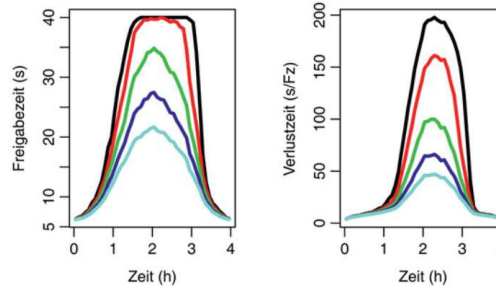


Abb. 15.7 Freigabezeiten (links) und Verlustzeiten (rechts) an einer simulierten adaptiven Anlage, dargestellt als Funktion der Zeit und für verschiedene Anteile autonomer Fahrzeuge, $\eta = 0\%$, 25%, 50%, 75%, 100%. Die Nachfrage war mit $q_0 = 180 \text{ Fz/h}$ und $q_1 = 720 \text{ Fz/h}$ parametrisiert

Quelle: Wagner, 2015

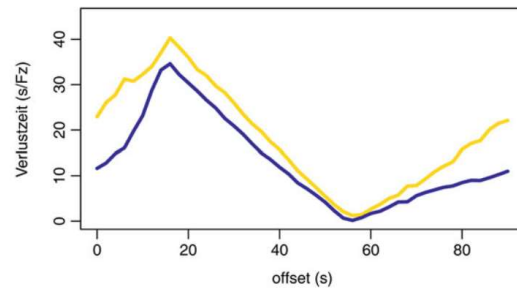
Weiter führt (Wagner, 2015) auf Basis von Simulationsergebnissen aus, dass bei einer **adaptiven LSA** mit einer Veränderung der Freigabezeiten und einer Optimierung der Umlaufzeit deutlich geringere Verlustzeiten durch die Automatisierung auftreten. Die schwankende Nachfrage wurde dabei als Sinuskurve modelliert. Mit zunehmender Durchdringung automatisierter Fahrzeuge (alle Fahrzeuge konventionell: schwarz, alle Fahrzeuge automatisiert: hellblau) nehmen diese Effekte der Leistungsfähigkeit schrittweise zu.

3. LSA: Koordination (Resultate Simulation)

Makroskopisch: Verkehrsströme

Offset: Zeitpunkt der Freigabe (für Reisezeit = Zeitversatz ist das System im optimalen Zustand)

Automatisierte Fahrzeuge (blau) führen zu geringen Verbesserungen, da die Pulks stärker komprimiert sind



Quelle: Wagner, 2015

Bei der **Koordination von LSA** weist (Wagner, 2015) auf Basis von weiteren Simulationsergebnissen darauf hin, dass mit den reduzierten Folgezeitlücken von automatisierten Fahrzeugen der Offset bei koordinierten LSA (Zeitpunkt der Freigabe im Relation zur vorangegangenen LSA) gleichbleibt, da sich die Geschwindigkeiten nicht unterscheiden. Für koordinierte LSA sind allenfalls geringe Verbesserungen in Bezug auf die stärkere Komprimierung von Fahrzeugpuls zu erwarten.

3. Auswirkungen auf Stadtgebiet (Resultate Simulation)

Makroskopisch: Verkehrsströme

Erste Abschätzungen durch vereinfachte Simulationen

Braunschweig (DLR): Verringerung der Verlustzeiten zwischen 5-80% (Mittelwert: 40%) bei einer Veränderung der Zeitlücke von $T_h = 1.0\text{ s}$ (mit Streuung) auf $T_a = 0.5\text{ s}$ (fest)

Schneller, aber nicht stabiler

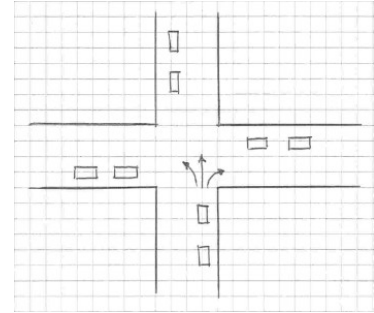


Quelle: Wagner, 2015

Auf Basis einer **Netzsimulation** der Stadt Braunschweig unter Berücksichtigung einer reduzierten Folgezeitlücke von 1.0 s (konventionelle Fahrzeuge) auf 0.5 s (automatisierte Fahrzeuge) hat (Wagner, 2015) eine Abschätzung der Wirkungen vorgenommen. Werden alle Personenwagen als automatisierte Fahrzeuge modelliert, reduzieren sich die Verlustzeiten um 5-80% (Mittelwert: 40%). Die Streuung der Verlustzeiten nimmt im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen nicht ab. Allenfalls könnte die Streuung durch die Vernetzung der Fahrzeuge reduziert werden. Es muss hier erwähnt werden, dass gemäss (Wagner, 2015) die LSA nicht vollständig korrekt abgebildet werden. Die Aussagekraft ist damit schwierig zu bestimmen.

3. Weitere Ansätze für Einflüsse automatisierter Fahrzeuge

- Reduktion der **LSA-Zwischenzeiten** durch erhöhte Geschwindigkeiten und weniger Streuung: Nur bei 100% automatisierten Fahrzeugen
- Anpassung von **Mindestsignalzeiten**: Nur bei 100% automatisierten Fahrzeugen
- Frühzeitigere Adaption des Betriebs (Erweiterung **Detektionsraum**): nur mit hoher Vernetzung bzw. C2I
- **Aufhebung LSA** und Betriebsoptimierung, Raum-Zeit-Reservationen (Wegangabe), optimale Geschwindigkeiten: vor allem bei hoher Durchdringung, Integration Fuss-/Veloverkehr offen



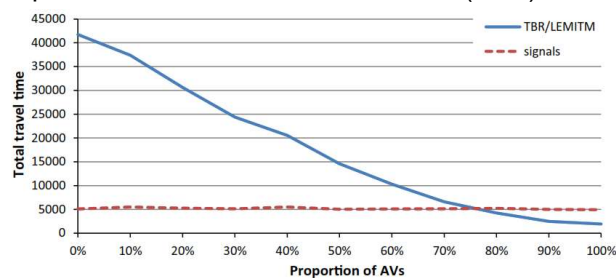
Weitere Ansätze der Wirkungen automatisierter Fahrzeuge auf städtische LSA sind:

- **Reduktion der Zwischenzeiten:** nur möglich wenn alle Fahrzeuge eine erhöhte Räumgeschwindigkeit und eine geringere Streuung der Zeitbedarfswerte aufweisen, folglich nur für vollständige Durchdringung der Gesamtflotte mit automatisierten Fahrzeugen
- **Anpassung Mindestsignalzeiten:** Bei automatisierten Fahrzeugen wird die Reaktionszeit verringert und die mittlere Räumgeschwindigkeit erhöht. Bei hohen Durchdringungsraten könnten die LSA-Mindestzeiten (Freigabe, Sperrung) reduziert werden. Es sind jedoch eher geringe Effekte zu erwarten, da vor allem schwach befahrene Knotenäste betroffen sind.
- **Frühzeitigere Adaption:** Durch frühzeitigere Detektion der Fahrzeuge (Datenübermittlung anstatt Anmeldung über Induktionsschleifen) kann allenfalls der LSA-Betrieb weiter optimiert werden.
- **Aufhebung LSA:** Vor allem bei einer hohen Durchdringung der Gesamtflotte mit automatisierten Fahrzeugen könnten LSA aufgehoben werden, wenn ein zuverlässiges Anmelde- und Führungssystem (Steuerungsbefehle) im Knoten eingerichtet werden kann (siehe nächste Folie). Für die Integration des Fuss-/Veloverkehrs muss jedoch eine Lösung gefunden werden.

3. Simulationen optimierter Knotenbetrieb

Optimierter Knotenbetrieb durch Zeit-Raum-Reservation im Knoten (anstatt LSA) bietet Potential für weitere Kapazitätserhöhungen, aber nur für hohe Durchdringungsraten vernetzter automatisierter Fahrzeuge (C2C, C2I). Für konventionelle Fahrzeuge müssen «Sicherheitslots» mit allen Knotenbeziehungen berücksichtigt werden.

Bsp. Simulation für Stadtnetz in Austin (USA)



Quelle: Levin/Boyles, 2015

Makroskopisch: Verkehrsströme

(Levin/Boyles, 2015) berechneten auf Basis eines Optimierungsalgorithmus, welche Effekte ein **Knotenbetrieb mit Raum-Zeit-Anmeldung** (anstatt LSA) auf die Reisezeiten hat. Voraussetzung ist eine starke Vernetzung zwischen Fahrzeugen bzw. zur Infrastruktur. Fahrzeuge queren den Knoten auf einer optimierten Trajektorie, sodass die Gesamtreisezeiten minimiert werden. Es können optimale Geschwindigkeiten und minimale Haltevorgänge erreicht werden. Automatisierte Fahrzeuge müssen ihren Start- und Endpunkt angeben. Für nicht-automatisierte Fahrzeuge müssen «Sicherheitslots» mit allen möglichen Knotenbeziehungen eingerichtet werden, was die Leistungsfähigkeit reduziert. Daher ist bei einer tiefen Durchdringung die Reisezeit deutlich höher als bei einem LSA-gesteuerten Knoten. Für höhere Anteil automatisierter Fahrzeuge können jedoch die Reisezeiten reduziert werden, der Schnittpunkt befindet sich gemäss Modellresultaten bei rund 75% Durchdringung (mind. Level 4).

Neben der Zulässigkeit der getroffenen Annahmen stellt sich zudem die Frage, wie Fuss- und Veloverkehr in eine solche Betrachtung aufgenommen werden kann. Freigabezeiten für Querungen am Knoten wurden dabei nicht berücksichtigt (Simulation für Austin, USA).

3. Zusammenfassung: Stadtstrassen/Ortsdurchfahrten

Makroskopisch: Verkehrsströme

Kapazitäten:

- Friedrich, 2015 (statisch): Kapazitätserhöhung um 20-40%
- Wagner, 2015 (Simulation): Verringerung der Verlustzeiten um ca. 40%

Weitere Effekte:

- Harmonisierte Zeitabstände
- erhöhte Räumgeschwindigkeiten
- Reduktion der Freigabezeiten (bei gleichbleibender Nachfrage)
- Offen: Stabilität des Verkehrsflusses im Gesamtnetz

Die ausgewählte Literatur kann wie folgt zusammengefasst werden:

Kapazitätssteigerungen mit automatisierten Fahrzeugen sind möglich, wenn die **Folgezeitlücken** im Mittel reduziert und/oder die Räumgeschwindigkeit erhöht werden können. Basis der Betrachtung ist die Räumung der LSA-Knotenzufahrten. Experten gehen bei den Zeitlücken von Reduktionspotentialen auf 0.3-0.5 s aus. Durch Antizipation erreichen konventionelle Fahrerinnen und Fahrer bereits heute im Mittel 0.6 s. Die Kapazitätseffekte dürften hier also im Vergleich zu Hochleistungsstrassen geringer sein. Statisch abgeschätzt wurden **Kapazitätssteigerungen von 20-40%** (bei vollständiger Automatisierung). Wiederum gilt: Werden die Systeme aufgrund von Sicherheitsüberlegungen mit höheren Zeitlücken konfiguriert, besteht die Gefahr einer Leistungsreduktion.

Bei höheren Sättigungsverkehrsstärken können sowohl Freigabezeiten für den MIV, als auch Umlaufzeiten reduziert werden. Je nach Verkehrspolitik könnten diese Reserven dem Fuss- und Veloverkehr zu Gute kommen. Allgemein muss eine Abstimmung mit den **Interessen aller Verkehrsteilnehmenden** stattfinden. Bei höheren Durchdringungen automatisierter Fahrzeuge an der Gesamtflotte sind neue Steuerungsmodelle denkbar (Bsp. Raum-Zeit-Anmeldung bei erhöhter Vernetzung), allerdings existieren hierzu noch einige offene Fragen.

4. Fazit Leistungsfähigkeit

4. Übersicht Annahmen Zeitlücken automatisierter Fahrzeuge

Hochleistungsstrassen (HLS)		
Quelle	Zeitlücke	Bedingung
Friedrich, 2015	minimal 0.5 s	Erkennen automatisierter Fahrzeuge untereinander
Wagner, 2015	minimal 0.3 – 0.5 s	-
Fellendorf, 2017	0.9 s	Platooning
Motamedidehkordi/ Hoffmann, 2017	1.8 s 0.9 s 0.5 s	nicht-vernetzte Fahrzeuge vernetzte Fahrzeuge extreme Einstellungen (HLS, Vernetzung)
Stadtstrassen		
Quelle	Zeitlücke	Bedingung
Friedrich, 2015	minimal 0.3 s	an LSA
Wagner, 2015	minimal 0.5 s	Gesamtnetz

Die ausgewiesenen Kapazitätswirkungen automatisierter Fahrzeuge in der Literatur sind von den angenommenen **Folgezeitlücken** abhängig. Eine Übersicht über die Annahmen gibt obenstehende Tabelle ab. Es wird erwartet, dass die **Vernetzung** eine (weitere) Reduktion der Zeitlücken herbeiführen kann (vgl. Motamedidehkordi/Hoffmann, 2017).

4. Grössenordnung Wirkungen HLS

im Vergleich zu einer mittleren menschlichen Zeitlücke von ca. 1.4 s

	Z2/3: Vereinzelt automatisierte Fahrzeuge auf tiefen Levels	Z4/5: Mischverkehr mit hohem Anteil automatisierter Fahrzeuge	Z6: <i>Beinahe</i> vollständig automatisierter Verkehr
Ohne «Online»-Vernetzung während der Fahrt	Zeitlücken von minimal 0.9 s Beinahe vernachlässigbare Kapazitätswirkungen Geringfügig verbesserte Stabilität des Verkehrsflusses	Zeitlücken von minimal 0.9 s Geringe Kapazitätswirkungen im Bereich von 5-10% Leicht erhöhte Stabilität des Verkehrsflusses	Zeitlücken von minimal 0.9 s Höhere Kapazitätswirkungen im Bereich von 20-30% Deutlich verbesserte Stabilität des Verkehrsflusses
Vernetzung zwischen Fahrzeugen (C2C)	Zeitlücken von minimal 0.5 s Beinahe vernachlässigbare Kapazitätswirkungen Geringfügig verbesserte Stabilität des Verkehrsflusses	Zeitlücken von minimal 0.5 s Mittlere Kapazitätsverbesserungen Leicht erhöhte Stabilität des Verkehrsflusses	Zeitlücken von minimal 0.5 s Deutlich höhere Kapazitätswirkungen (>30%) möglich Deutlich verbesserte Stabilität des Verkehrsflusses
Starke Vernetzung (C2X)	Zeitlücken von minimal 0.5 s Beinahe vernachlässigbare Kapazitätswirkungen Geringfügig verbesserte Stabilität des Verkehrsflusses	Zeitlücken von minimal 0.5 s Mittlere Kapazitätsverbesserungen Leicht erhöhte Stabilität des Verkehrsflusses	Zeitlücken von minimal 0.5 s Deutlich höhere Kapazitätswirkungen (>30%) möglich Deutlich verbesserte Stabilität des Verkehrsflusses

Die aufgeführte Tabelle fasst die Resultate für freie HLS-Strecken in den beiden Dimensionen **Durchdringung** von automatisierten Fahrzeugen sowie **Vernetzung** zusammen. Durch zunehmende Vernetzung kann die Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen reduziert werden. Als minimaler Wert wird 0.5 s in der Literatur aufgeführt. Nimmt die Durchdringung zu, erhöht sich die Kapazität überproportional. Bei vollständig automatisiertem Verkehr dürfte bei einer Zeitlücke von 0.9 s die Erhöhung gemäss den Resultaten von (Fellendorf, 2017) bei maximal 30% liegen. Für Zeitlücken von 0.5 s ist der Kapazitätseffekt grösser.

4. Grössenordnung Wirkungen Stadt/LSA

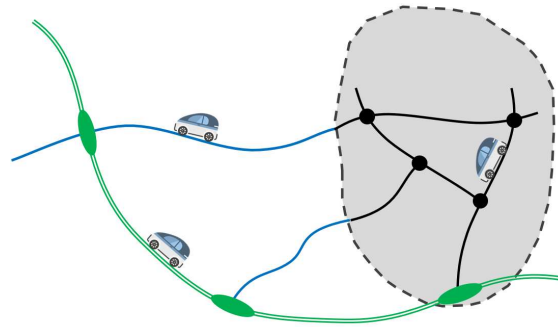
im Vergleich zu einer mittleren menschlichen Zeittücke von minimal 0.6 s

	Z2/3: Vereinzelt automatisierte Fahrzeuge auf tiefen Levels	Z4/5: Mischverkehr mit hohem Anteil automatisierter Fahrzeuge	Z6: <i>Beinahe</i> vollständig automatisierter Verkehr
Ohne «Online»-Vernetzung während der Fahrt	Zeitlücken von minimal 0.5 s Beinahe vernachlässigbare Kapazitätswirkungen	Zeitlücken von minimal 0.5 s Beinahe vernachlässigbare Kapazitätswirkungen	Zeitlücken von minimal 0.5 s Geringe Kapazitätswirkungen im Bereich von max. 5%
Vernetzung zwischen Fahrzeugen (C2C)	Zeitlücken von minimal 0.3 s Beinahe vernachlässigbare Kapazitätswirkungen	Zeitlücken von minimal 0.3 s Geringe Kapazitätswirkungen im Bereich von ca. 5%	Zeitlücken von minimal 0.3 s Mittlere Kapazitätswirkungen (10-20%)
Starke Vernetzung (C2X)	Zeitlücken von minimal 0.3 s Beinahe vernachlässigbare Kapazitätswirkungen	Zeitlücken von minimal 0.3 s Geringe Kapazitätswirkungen im Bereich von ca. 5%	Zeitlücken von minimal 0.3 s Mittlere Kapazitätswirkungen (10-20%)

Analog werden die Resultate für städtische Abschnitte in den beiden Dimensionen **Durchdringung** von automatisierten Fahrzeugen sowie **Vernetzung** zusammengefasst. Durch zunehmende Vernetzung kann die Zeittücke von heute minimal 0.6 s (bei Antizipation an der LSA) auf minimal 0.3 – 0.5 s reduziert werden. Die Kapazitätswirkungen fallen geringer aus als auf dem HLS-Netz.

4. Folgerungen Gesamtnetz

- «**Flaschenhalse**» und **Übergänge** übergeordnetes/untergeordnetes Netz für Kapazität im gesamten HLS-Netz massgebend
- Im Schweizer Strassennetz sind viele solcher «Flaschenhalse» vorhanden
- Nur geringe Erhöhung der **Kapazität** in «Flaschenhälsen» und Übergängen zu erwarten.
- Erhöhung **Stabilität** des Verkehrsfluss durch automatisierte Fahrzeuge



Für die Leistungsfähigkeit des Gesamtnetzes sind – vor allem bei wenig Redundanz – Abschnitte mit der geringsten Kapazität massgebend («**Flaschenhalse**»). Die Kapazitätseffekte automatisierter Fahrzeuge sind in solchen Abschnitten besonders relevant. Im Schweizer Kontext mit einer hohen Verkehrsnachfrage in einem dichten Raum sind viele «Flaschenhalse» vorhanden – im Vergleich mit anderen europäischen Ländern deutlich mehr.

Einerseits hat das automatisierte Fahren auch in Flaschenhälsen eine **Kapazitätswirkung**. Die Resultate von (Fellendorf, 2017) zeigen jedoch auf, dass in Verflechtungszonen und Knoten die Kapazitätseffekte deutlich geringer ausfallen als auf der freien (HLS-)Strecke. Zudem wird bereits heute in kapazitätskritischen Abschnitten mit geringen Zeitlücken (menschlich) gefahren. Daher dürfte die Kapazität in Flaschenhälsen nur geringfügig ansteigen.

Andererseits dürfte die **Stabilität** des Verkehrsflusses in diesen Zonen durch automatisierte Fahrzeuge zunehmen. Dies führt dazu, dass die Abschnitte länger mit höheren Geschwindigkeiten befahren werden können und Verkehrszusammenbrüche weniger oft auftreten.

4. Folgerungen bezüglich Leistungsfähigkeit

- Soll die Kapazität der Infrastruktur gesteigert werden, müssen geringe **Fahrzeugfolgeabstände** zwischen automatisierten Fahrzeugen zugelassen werden.
- Sollen sich weitere Kapazitätseffekte einstellen, ist das kooperative Verhalten auf Basis einer erhöhten **Vernetzung** zu fördern.
- Signifikante Kapazitätssteigerungen stellen sich erst mit **hohem Nutzungsgrad** der automatisierten Systeme ein. Werden diese Steigerungen gewünscht, ist die Automatisierung der Fahrzeugflotte zu fördern.

Aus der rein verkehrstechnischen Betrachtung der Leistungsfähigkeit lassen sich drei **Folgerungen** ableiten:

Die zitierten Untersuchungen zeigen vor allem, dass die Annahmen zu den Zeitlücken wichtig sind. Je geringer diese ausfallen, desto höher sind die Kapazitätsgewinne. Will man diese realisieren, müssen also **kurze Folgeabstände** für automatisierte Fahrzeuge zugelassen werden.

Weiter wird davon ausgegangen, dass die Vernetzung eine weitere Reduktion der Zeitlücken bewirken kann. Fahrzeuge verhalten sich kooperativer und schliessen näher auf. Zur Maximierung der Leistungsfähigkeit muss die **Vernetzung** gefördert werden.

Weiter nimmt die Kapazität mit zunehmendem Nutzungsgrad der automatisierten Fahrzeuge überproportional zu. In Bezug auf die Leistungsfähigkeit ist folglich eine möglichst **hohe Durchdringung** anzustreben.

5. Verkehrsmanagement

Mit der Einführung von automatisierten Strassenfahrzeugen entstehen **neue Möglichkeiten im Verkehrsmanagement**. Zudem besteht die Herausforderung eine nachhaltige Entwicklung im Verkehr zu erreichen. Dieses Thema wird im Folgenden aufgenommen.

5. Definition Verkehrsmanagement

SN 640 781 Verkehrsmanagement – Begriffssystematik:

Gesamtheit aller Massnahmen planerischer, technischer, organisatorischer und rechtlicher Art, die räumlich und zeitlich geeignet sind, den **gesamten Verkehrsablauf** für Benutzer, Betreiber und Betroffene optimal zu gestalten.

Für Diskussion (hier): **umfassendes Verständnis**, z.B. auch Verkehrsmittelwahl

Gemäss Grundnorm SN 640 781 wird unter dem **Begriff Verkehrsmanagement** die «*Gesamtheit aller Massnahmen planerischer, technischer, organisatorischer und rechtlicher Art, die räumlich und zeitlich geeignet sind, den **gesamten Verkehrsablauf** für Benutzer, Betreiber und Betroffene optimal zu gestalten.*» Mit dieser Definition wird ein grosses Feld geöffnet. Meist werden unter dem Begriff Verkehrsmanagement Massnahmen subsumiert, die im Zusammenhang mit Leiten (entlang einer Strecke), Lenken (Routenwahl) und Steuern (im Knoten) stehen und ohne massgebliche Ausbauten der Verkehrsinfrastruktur auskommen.

Für die Diskussion des Verkehrsmanagements im Zusammenhang mit der Automatisierung wird der Begriff **umfassend** verstanden und Massnahmen mitgedacht, die auch das Mobilitätsmanagement betreffen (Bsp. Verkehrserzeugung, Verkehrsmittelwahl).

5. Sammlung von denkbaren Instrumenten (1/2)

- Weitgehend unveränderte Instrumente zur Wahrung der Mobilitätsfreiheiten
- Integriertes Verkehrsmanagement (verkehrsmittelübergreifend)
- **Priorisierung** der Fahrten (Bsp. nach Verkehrszweck, an LSA)
- Vollständige Steuerungsübergabe in **Knoten** (vom Fahrer an übergeordnetes System)
- **Übersteuerung** von Fahrwünschen in kritischen Raum-Zeit-Bereichen
- Vorgabe der **Routenwahl** über Leitzentrale, Angabe von Start- und Zielpunkt
- **Zonen** für automatisierte Kleinfahrzeuge
- Verbot von **Leerfahrten**, Vorgaben Besetzungsgrad

Sowohl mit der Begleitkommission (01.02.18) als auch an einem Start-Workshop (07.11.17) wurden **denkbare Instrumente** des Verkehrsmanagements gesammelt, die insbesondere mit automatisierten Strassenfahrzeugen umgesetzt werden könnten. Dabei wurden folgende Möglichkeiten genannt:

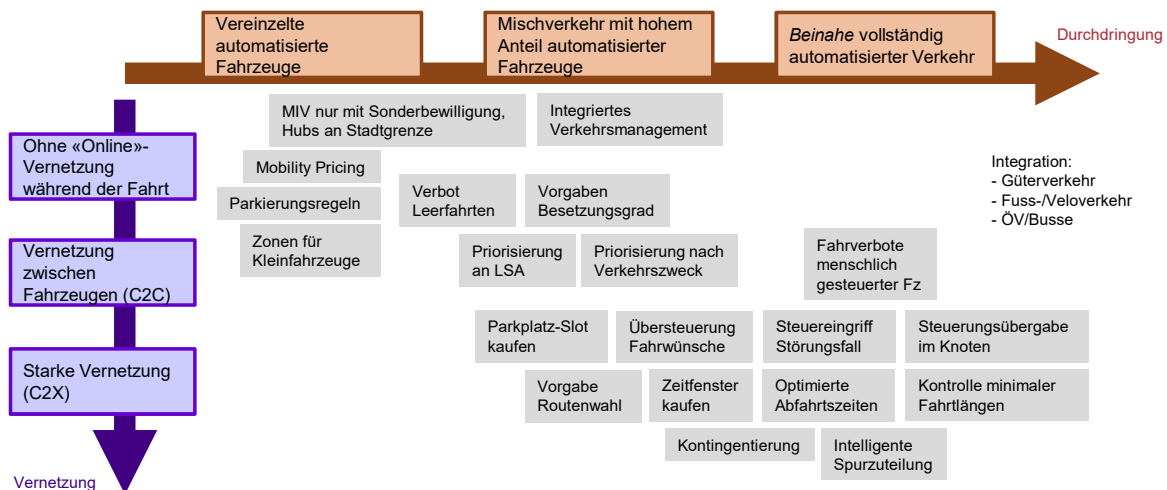
- **Unverändertes Verkehrsmanagement:** Damit die (Mobilitäts-)Freiheiten der Nutzerinnen und Nutzer von Strassenfahrzeugen gewahrt bleiben, wird das Verkehrsmanagement gegenüber heute nicht erweitert.
- **Integriertes Verkehrsmanagement:** Verkehrsmittelübergreifendes Verkehrsmanagement zur koordinierten Verarbeitung der Verkehrsnachfrage unter Berücksichtigung aller Verkehrsansprüche (Bsp. verbesserter Knotenbetrieb mit MIV, ÖV, Fuss-/Veloverkehr).
- **Priorisierung der Fahrten:** Bei Kapazitätsengpässen werden diejenigen Fahrzeuge bevorzugt, die einen höher einzustufenden Verkehrszweck (Bsp. Geschäftsfahrten) aufweisen oder die Maximierung des Personenflusses ermöglichen (Bsp. gefüllte Busse).
- **Steuerungsübergabe in Knoten:** Strassenfahrzeuge werden im Knoten durch eine übergeordnete Steuerungsebene gelenkt, menschliches Fahren ist nicht möglich (sofern mit automatisierten Systemen ausgestattet). Der Knotenbetrieb erfolgt optimiert und mit einer Raum-Zeit-Anmeldung (anstatt LSA).
- **Übersteuerung von Fahrwünschen:** In kritischen Raum-Zeit-Bereichen (Engpässe wie bspw. Verflechtungszonen) wird menschliches Fahren – zugunsten eines optimierten Betriebs der Infrastruktur (Kapazität, Stabilität) – durch das System übersteuert.
- **Vorgabe der Routenwahl:** Bei automatisierten Fahrzeugen werden nur Start- und Zielpunkt der Fahrten angemeldet. Über eine Leitzentrale wird die Routenwahl vorgegeben, sodass Überlastungssituationen reduziert bzw. verhindert werden können.
- **Zonen**, in denen nur automatisierte **Kleinfahrzeuge** fahren dürfen, sollen helfen, die Kapazitäten zu verbessern und den Platzbedarf des Verkehrs zu minimieren.
- **Vorgaben des Besetzungsgrades:** Automatisierte Strassenfahrzeuge dürfen kritische Abschnitte des Netzes nur befahren, wenn sie einen vorgegebenen minimalen Besetzungsgrad einhalten. Dieses Instrument kann bis zum (generellen) Verbot von Leerfahrten gehen.

5. Sammlung von denkbaren Instrumenten (2/2)

- **Parkierungsregeln** bzgl. automatisierter Fahrzeuge, Parkplatz-Slots kaufen und Fahrten darauf optimieren
- Anmeldung und Optimierung von **Abfahrtszeiten** (Zeitfenster kaufen)
- Minimale **Fahrtlängen** (über Anmeldung)
- Steuerungseingriffe **Störungsfall**
- Intelligente **Spurteilung** (gemäss angemeldeter Fahrten)
- **Mobility Pricing**: Verhaltenslenkung über Benutzungsgebühren
- Stadt: MIV nur mit **Sonderbewilligung**, Umsteigen auf ÖV oder SVV (Sammeltaxis), «Hubs» an der Stadtgrenze

- **Parkierung**: Über Parkplätze besteht ein weiteres Instrument der Einflussnahme, zum Beispiel mit besonderen Parkierungsregeln für automatisierte Fahrzeuge. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Belegungsanmeldung bei Parkplätzen (Verhinderung Parksuchverkehr) und darauf optimierten Fahrten (Bsp. Abfahrtszeitpunkt).
- **Kauf von Zeitfenstern**: Das Bereitstellen und die Vergabe von *slots* könnte nicht nur auf Parkfelder, sondern auch auf das gesamte Strassennetz angewendet werden. Damit werden Überlastungssituationen in kapazitätskritischen Abschnitten verhindert.
- **Anmeldung mit Fahrtlängen**: Angemeldete Fahrten werden auf Basis der geplanten Fahrtlängen geprüft und erst bei der Einhaltung eines Mindestkriteriums (Bsp. 1 km) bewilligt.
- **Störungsfall**: Kommt es zu Störungen im Betrieb des Strassennetzes (Bsp. Unfall) führt eine Steuerungsebene Eingriffe in die Fahrzeugsteuerung aus, um die Folgen der Störung (Überlastung, erhöhte Reisezeiten) zu minimieren.
- **Intelligente Spurteilung**: Mehrstreifige Strassen könnten infolge der Automatisierung (Bsp. Anmeldung der Fahrten) betrieblich auf die Verkehrsnachfrage angepasst werden. Dabei werden Spuren den Lastrichtungen adaptiv zugeordnet. Die Übergänge werden durch eine Steuerungsebene organisiert.
- **Mobility Pricing**: Mit Gebühren für die Mobilität (durchgeführte Wege) kann das Verhalten der Verkehrsteilnehmenden gelenkt werden. In Kombination mit der Automatisierung bestehen insbesondere Möglichkeiten zur Bepreisung von unterschiedlichen Besetzungsgraden der Fahrzeuge oder von Fahrtwünschen auf kapazitätskritischen Abschnitten.
- **Sonderbewilligung**: In Räumen mit besonders grosser Verkehrsnachfrage wird der MIV zugunsten des auf maximale Personenbewegungen optimierten Kollektivverkehrs generell verboten. Nur mit Sonderbewilligungen und Nachweisen von besonderen Bedürfnissen dürfen MIV-Fahrzeuge diese Räume befahren. Für alle anderen gibt es *hubs* zum Umsteigen auf den Kollektivverkehr.

5. Einordnung Instrumente des Verkehrsmanagements



04.04.2018 | Verkehrstechnik

© EBP | 61

In Zusammenarbeit mit der Begleitkommission wurden die Voraussetzungen für den Erfolg eines Instruments genauer festgelegt. Hierfür wurden die Instrumente in den beiden Dimensionen **Durchdringung** (x-Achse) und **Vernetzungsgrad** (y-Achse) eingeordnet. Oben aufgeführt wird das Resultat der Diskussion anlässlich der BK-Sitzung vom 01.02.18.

Einige Instrumente, die durch die Automatisierung möglich bzw. erforderlich werden könnten, sind nicht zwingend mit einer hohen Vernetzung verbunden. Beispielsweise kann eine Kontrolle von Besetzungsgraden auch visuell erfolgen. Andere Instrumente bedingen einen hohen Datenaustausch zwischen einer Steuerungsebene (Bsp. Verkehrsleitzentrale) und dem einzelnen Fahrzeug (Bsp. Vorgabe Routenwahl).

Alle eingesetzten Instrumente basieren auf einer strategischen Ausrichtung. Hierfür müssen die **Ziele des Verkehrsmanagements** geklärt werden.

5. Einordnung Instrumente des Verkehrsmanagements

Instrument	Zeitwahl	Verkehrsmittelwahl	Routenwahl	Fahrzeugbesetzung	Steuerung Mensch/System	Integriertes Verkehrsmanagement	Hauptakteure
Unverändertes Verkehrsmanagement	frei	frei	frei	frei	frei	möglich	Bund, Kantone, Städte
Bevorzugung von Fahrten (nach Verkehrsmittel)	frei	unterschiedliche Wartezeiten	frei	frei	frei	MIV-SVV-ÖV	Kantone, Städte
Bevorzugung von Fahrten (nach Quell-Ziel-Beziehung)	frei	frei	unterschiedliche Wartezeiten	frei	frei	MIV-SVV	Bund, Kantone, Städte
Bevorzugung von Fahrten (nach Besetzungsgrad)	frei	frei	frei	unterschiedliche Wartezeiten	frei	MIV-SVV	Bund, Kantone, Städte
Steuerungsübergabe in Knoten	frei	frei	frei	frei	vorgegeben	nur MIV	Kantone, Städte
Übersteuerung von menschl. Fahrwünschen	frei	frei	frei	frei	vorgegeben	nur MIV	Bund, Kantone, Städte
Vorgabe der Routenwahl (Anmeldung Start - Ziel)	frei	frei	vorgegeben	frei	vorgegeben	nur MIV	Bund, Kantone, Städte
Verbot Leerfahrten, Vorgaben Besetzungsgrad	frei	frei	frei	vorgegeben	frei	SVV-MIV	Bund, Kantone, Städte
Parkierungsregeln/-gebühren	finanzielle Anreize	finanzielle Anreize	frei	finanzielle Anreize	frei	nur MIV	Städte
Parkplatzslots (Anmeldung)	vorgegeben	frei	frei	frei	vorgegeben	nur MIV	Städte
Kauf von Zeitfenstern, optimierte Abfahrtszeiten	vorgegeben	frei	vorgegeben	frei	vorgegeben	SVV-MIV	Bund, Kantone, Städte
Steuerungsseingriffe Störungsfall	frei	frei	frei	frei	vorgegeben	SVV-MIV	Bund, Kantone
Intelligente Spurteilung	vorgegeben	frei	vorgegeben	frei	vorgegeben	SVV-MIV	Bund, Kantone
Mobility Pricing	finanzielle Anreize	finanzielle Anreize	finanzielle Anreize	finanzielle Anreize	finanzielle Anreize	MIV-SVV-ÖV	Bund, Kantone
MIV mit Sonderbewilligung	frei	vorgegeben	frei	frei	vorgegeben	MIV-SVV-ÖV	Städte

04.04.2018 | Verkehrstechnik

© EBP | 62

Grundsätzlich muss die Frage der **individuellen (Mobilitäts-)Freiheiten** diskutiert werden. Einige Instrumente schränken die Freiheiten der Verkehrsteilnehmenden zugunsten eines systemoptimalen Verhaltens stark ein (Wahl des Zeitpunkts einer Fahrt, des Verkehrsmittels und der Route sowie Besetzung und Steuerungsart der Fahrzeuge). Solche Instrumente müssten gesellschaftlich akzeptiert sein.

In der obenstehenden Tabelle werden die gesammelten Instrumente in Bezug auf die Mobilitätsfreiheiten (bzw. dem Eingriff der individuellen Freiheiten) in den verschiedenen Dimensionen eingeordnet. Dabei werden **drei Stufen des Eingriffs** unterschieden (zunehmend): Wahrung der Freiheit, zeitliche oder finanzielle Anreize, Vorgaben/Verbote. Durch die Bepreisung werden die Freiheiten grundsätzlich nicht eingeschränkt, allerdings wird die Mobilität stark mit der Zahlungskraft bzw. Zahlungsbereitschaft des einzelnen Verkehrsteilnehmenden verknüpft (mit entsprechender Sozialthematik). Bei den Verboten sollte jeweils differenziert werden, ob diese für das gesamte Strassennetz oder nur für Teilabschnitte gelten.

In der Tabelle wird aufgeführt, ob die Instrumente einem **integrierten Verkehrsmanagement** (verkehrsmittelübergreifend) entsprechen oder nur einzelne Verkehrsmittel (insbesondere den MIV) betreffen. Auch auf den Sammel- und Verteilverkehr (SVV, Sammeltaxis im Übergangsbereich von MIV und ÖV) wird je nach Instrument Einfluss genommen. Zudem werden die **Hauptakteure** genannt. Grundsätzlich gilt jeweils der Eigentümer der betroffenen Verkehrsinfrastruktur als Hauptakteur. Sind schweizweite Lösungen zu Mobilität und Verkehr notwendig, muss der Bund entsprechende Regelungen finden. Finden Instrumente vor allem in einer Agglomeration Anwendung, sind Kantone aktiv. Auf kommunaler Ebene (Bsp. Parkierung) sind Städte und Gemeinden Hauptakteure.

5. Erkenntnisse Verkehrsmanagement (1/2)

- Automatisierte Fahrzeuge stellen **neue Anforderungen** an das Verkehrsmanagement, bringen aber auch **neue Steuerungsmöglichkeiten**.
- Viele verschiedene Instrumente zum Verkehrsmanagement sind denkbar, sie unterscheiden sich in Bezug auf notwendige **Vernetzung** und **Durchdringung**.
- Die Instrumente haben zum Teil deutliche Wirkungen auf die **Freiheit** von Zeit-, Verkehrsmittel- und Routenwahl sowie zur Besetzung und Steuerung der Fahrzeuge.

Aus der Untersuchung zum Verkehrsmanagement lassen sich folgende **Erkenntnisse** gewinnen:

- Automatisierte Fahrzeuge stellen durch ihre grossen Auswirkungen auf das Verkehrssystem (Bsp. erhöhte Nachfrage) neue **Anforderungen** an das Verkehrsmanagement. Gleichzeitig ermöglichen sie aber auch neue Steuerungsinstrumente (insbesondere durch eine erhöhte Vernetzung).
- Durch veränderte Fahrzeugsteuerung und Kommunikationsmöglichkeiten infolge automatisierter Fahrzeugen sind viele verschiedene Instrumente zum Verkehrsmanagement denkbar, die sich jedoch in Bezug auf notwendige **Vernetzung** und notwendiger **Durchdringung** von automatisierter Fahrzeugen in der Gesamtflotte unterscheiden.
- Die Instrumente haben zum Teil deutliche Wirkungen auf die Mobilitätsfreiheiten der Verkehrsteilnehmenden. Insbesondere sind die freie Zeit-, Verkehrsmittel- und Routenwahl der individuellen Wege sowie die Besetzung und Steuerung der Fahrzeuge (Mensch oder System) betroffen.

5. Erkenntnisse Verkehrsmanagement (2/2)

- Für **Bund, Kantone und Städte** entstehen neue Möglichkeiten zur Bevorzugung von Fahrten (z.B. mit einem hohen Besetzungsgrad oder bestimmte Ziel-Quell-Beziehungen). Damit verbunden sind jedoch Eingriffe in die (Mobilitäts-)Freiheiten.
- Sofern diese nicht mit **Strafen/Verboten** eingeschränkt werden sollen, kann der Verkehr auch mit **finanziellen Anreizen** beeinflusst werden (z.B. Mobility Pricing)
- **Parkplatzmanagement** ist ein bestehendes Steuerungsinstrument für **Städte**. Es besteht jedoch das Risiko eines Bedeutungsverlusts infolge eines erhöhten Car- und Ride-Sharings sowie möglichen Leerfahrten im MIV.



Bildquellen: Singapore ASS, 2017 / Kartton AG, 2017

Die angewendeten Instrumente im Verkehrsmanagement basieren immer auf einer **strategischen Ausrichtung**, die durch die verkehrspolitischen Akteure definiert wird. Aus der Betrachtung der Eigenschaften der Instrumente lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Für **Bund, Kantone und Städte** entstehen neue Möglichkeiten zur Bevorzugung von Fahrten (Bsp. Fahrzeuge mit hoher Besetzung oder bestimmte Quell-Ziel-Beziehungen). Damit verbunden sind jedoch Eingriffe in die (Mobilitäts-)Freiheiten.
- Sofern die Freiheiten nicht mit Strafen und Verboten eingeschränkt werden sollen, kann die Einflussnahme mit finanziellen Anreizen im Vordergrund stehen («Mobility Pricing», Bsp. nach Verkehrszeit, Verkehrsmittel, Route, Besetzung).
- Das Parkplatzmanagement ist ein zusätzliches Instrument zur Einflussnahme für **Städte und Gemeinden**. Dabei besteht jedoch das Risiko eines Bedeutungsverlusts infolge eines erhöhten Car- und Ride-Sharings sowie möglichen Leerfahrten im MIV.

6. Infrastrukturbedarf

Gemäss der Untersuchung zur Leistungsfähigkeit sind infolge der Automatisierung Kapazitätsgewinne möglich, wenn Fahrzeugfolgeabstände (Zeitlücken) reduziert werden können. Auf dieser Basis wurden mit der Begleitkommission Folgerungen für die **Bereitstellung der Infrastruktur** gezogen, die nachfolgend aufgeführt werden.

6. Erkenntnisse aus heutiger Sicht

Bereitstellung von Strassenkapazitäten

1. Die Kapazitäten im übergeordneten Netz nehmen *mittelfristig* durch das automatisierte Fahren **nicht massgeblich** zu.
2. Das Potential automatisierter Fahrzeuge kann trotz Mehrverkehr längerfristig helfen, **Ausbauten nicht notwendig** werden zu lassen.
3. Ein **Eigentrassee** für automatisierte Fahrzeuge ist für Übergangsphasen mit Mischverkehr im Schweizerischen Strassennetz (HLS und Stadtstrassen) aus räumlichen und netztopologischen Gründen wenig realistisch.
4. Ein Gewinn **an Flächeneffizienz** im städtischen Raum kann längerfristig allenfalls durch automatisierte Kleinfahrzeuge und/oder reduzierte Spurbreiten (bei vollständig automatisierter Flotte) erreicht werden.

1. Die Kapazitäten infolge der Automatisierung steigen vor allem bei hohem **Durchdringungsgrad** von automatisierten Fahrzeugen sowie kurzen Zeitlücken (begünstigt durch die Vernetzung). Zudem muss das Gesamtnetz mit limitierenden «Flaschenhälsen» betrachtet werden. Mittelfristig (Zustände 2-4) zeichnen sich daher **keine massgeblichen Kapazitätssprünge** ab (mind. 20%).

2. Die positiven Kapazitätseffekte können allenfalls – insbesondere bei hoher Durchdringung – längerfristig helfen, den **Bedarf an Infrastrukturausbauten** zu reduzieren (oder mind. zeitlich zu verzögern). Die Ausbauten sind jedoch nicht immer nur einer unzureichenden Kapazität geschuldet, sondern auch Sicherheitsüberlegungen.

3. Das automatisierte Fahren wird international in den Zuständen mit Mischverkehr auch **eigentrasseiert** beschrieben. Die Schweiz ist ein dicht besiedeltes Land und weist in Bezug auf Infrastrukturausbauten viele **räumliche Grenzen** auf. Für den städtischen Raum ist eine Bereitstellung von weiteren Flächen daher wenig realistisch. Im HLS-Netz scheint das Eigentrassee bei hoher Durchdringung wahrscheinlicher. Allerdings dürften sowohl der vorhandene Platz als auch die Struktur (hohe Anschlussdichte) Herausforderungen darstellen.

4. Die Kapazitätsgewinne im **städtischen Raum** dürften geringer sein als auf Hochleistungsstrassen (vgl. Grundlagen). Es scheint daher wenig realistisch, dass weitgehend ganze Fahrstreifen nicht mehr vom Verkehr beansprucht werden (Bsp. Reduktion von 3 auf 2 Spuren) und einer anderen Nutzung zukommen können. Solche Effekte bzgl. Flächeneffizienz sind allenfalls bei einer Reduktion der durchschnittlichen Fahrzeuglänge und/oder reduzierten Spurbreiten denkbar, letzteres jedoch nur bei vollständig automatisierter Flotte und genauem Spurverhalten aller Fahrzeuge.

6. Erkenntnisse aus heutiger Sicht

Weitere Aspekte der Infrastruktur

1. Erst bei grossem Anteil automatisierter Fahrzeuge können bei konstanter Nachfrage **Vorsortierflächen** bei LSA-Knoten reduziert werden.
2. Im Siedlungsraum braucht es **neu definierte Haltebereiche** für automatisierte Fahrzeuge (MIV oder Sammeltaxis/Ride-Sharing), um den Passagierwechsel zu ermöglichen. Diese müssen klar definiert und deren Benutzung geregelt sein.
3. Für die Effizienz automatisierten Fahrens ist eine erhöhte Vernetzung und eine entsprechende zuverlässige **Kommunikationsinfrastruktur** notwendig.

1. Im städtischen Kontext können durch geringere Zeitlücken mehr Fahrzeuge im Knoten verarbeitet werden. Bei gleichbleibender Nachfrage könnten so **Abbiegestreifen** kürzer und **Vorsortierflächen** mit einem geringeren Flächenbedarf neu organisiert werden (Bsp. Verzicht von Abbiegespuren). Dies erhöht die Flächeneffizienz zusätzlich.
2. Mit den neuen Mobilitätsangeboten (Bsp. Sharing im MIV oder Sammeltaxis) steigt die **Anzahl an Ein-, Aus- und Umsteigevorgängen**, insbesondere im Siedlungsraum. Hierfür müssen Haltebereiche definiert und deren Benutzung rechtlich geregelt werden. Die Haltebereiche sind innerhalb der bestehenden Infrastruktur oder mit Ergänzungen denkbar. Es ist noch offen, ob dazu bestehende Flächen genutzt oder neue bereitgestellt werden müssen (evtl. auch auf privatem Grund).
3. In der Literatur wird angenommen, dass mit einer erhöhten **Vernetzung** die Zeitlücken automatisierter Fahrzeuge weiter reduziert werden können. Eine zuverlässige Kommunikationsinfrastruktur, um diese Gewinne zu realisieren, ist dazu Voraussetzung.

3a) Verkehrstechnik

Studie zum Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag,
Vertiefungsmodul, Grundlagen und Erkenntnisse
Definitive Fassung vom 04.04.18

Literaturverzeichnis

- ATC (2012): Die Auswirkung der Länge der Grünphase auf den Fluss des Verkehrs, Riedel T., Adaptive Traffic Control, zur Verfügung gestellt von der Dienstabteilung Verkehr (DAV) der Stadt Zürich.
- Fellendorf, M. (2017); Automatisierung im Mischverkehr – verkehrswissenschaftliche Erkenntnisse, Überlegungen zur Leistungsfähigkeit; TU Graz, Vortrag am ÖVG-Forum *Automatisierung im Verkehr*.
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (2015): Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS)
- Friedrich, B. (2015); Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge; TU Braunschweig; in Maurer et al. (Hrsg.), *Autonomes Fahren*, Berlin: Springer.
- Klausner, S.; Irtenkauf P. (2013); Autonome Kolonnenfahrt auf Autobahnen; Stand der Technik, Umsetzung, Auswirkungen auf den Verkehrsfluss; Universität Stuttgart.
- Kruse S.; Motamedidehkordi, N.; Hoffmann S., Busch F. (2017); Mikroskopische Simulation von automatisierten Fahrzeugen zur Ermittlung der Wirkungen auf die Kapazität von Autobahnen; Technische Universität München; in *Fachzeitschrift Strassenverkehrstechnik* (Dezember 2017), FGSV Köln
- Levin M.; Boyles S. (2015); A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads, *Transportation Research Part C*.
- Motamedidehkordi, N.; Hoffmann S. (2017); Impact of Automated Vehicles on Capacity of the German Freeway Network, Conference Paper; Technische Universität München.
- Wagner, P. (2015); Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen; DLR Berlin; in Maurer et al. (Hrsg.), *Autonomes Fahren*, Berlin: Springer.