

Factsheet 06 Auswirkungen auf Strassenkapazität und Leistungsfähigkeit					
<p>Hintergrund</p>	<p>Selbstfahrende Fahrzeuge könnten auf der Strasse geringere Abstände einhalten, da sie eine gegenüber dem Menschen verbesserte Reaktionsgeschwindigkeit aufweisen. Würden dies nicht nur einzelne, sondern zahlreiche vernetzte Fahrzeuge tun, besteht die Möglichkeit, dass in einem Zeitabschnitt die gleiche Infrastruktur von einer höheren Anzahl Fahrzeuge befahren werden kann. Verkehrstechnisch spricht man von Strassenkapazität oder Leistungsfähigkeit von Strassen. Wenn sich diese durch selbstfahrende Fahrzeuge erhöhen, könnten einerseits bei gleicher Nachfrage Überlastzustände weniger oft auftreten und andererseits könnte sich der Infrastrukturbedarf verringern.</p>				
<p>Übersicht</p>	<div data-bbox="411 521 1198 645" data-label="Diagram"> </div> <div data-bbox="411 703 1219 1111" data-label="Figure"> <p>Kapazität bei gemischtem Verkehr und Berücksichtigung der Zeitlücken T_{ah}</p> <table border="1"> <tr> <td>$L_{plkw} = 7,5 \text{ m}$</td> </tr> <tr> <td>$T_a = 0,5 \text{ s}$</td> </tr> <tr> <td>$T_h = 1,15 \text{ s}$</td> </tr> <tr> <td>$T_{ah} = 0,9 \text{ s}$</td> </tr> </table> </div> <p data-bbox="400 1133 1514 1189">Oben: Beispiel von reduzierten Abständen resp. Folgezeitlücken nach Krause et al. (2017). Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge (links) im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen (rechts).</p> <p data-bbox="400 1196 1514 1279">Unten: Theoretische Kapazitätswirkungen nach Anteil selbstfahrender Fahrzeuge nach Friedrich (2015). Dabei wird eine Folgezeitlücke von 0.5 s für automatisierte Fahrzeuge und eine Folgezeitlücke von 1.15 s für menschlich gesteuerte Fahrzeuge verwendet.</p>	$L_{plkw} = 7,5 \text{ m}$	$T_a = 0,5 \text{ s}$	$T_h = 1,15 \text{ s}$	$T_{ah} = 0,9 \text{ s}$
$L_{plkw} = 7,5 \text{ m}$					
$T_a = 0,5 \text{ s}$					
$T_h = 1,15 \text{ s}$					
$T_{ah} = 0,9 \text{ s}$					
<p>Thema</p>	<p>Folgezeitlücken</p> <p>Die Kapazität einer Strasseninfrastruktur hängt direkt davon ab, welche Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen eingehalten werden. Bei Fahrerinnen und Fahrern sind diese notwendig, um auf Ereignisse auf der Strasse sicher reagieren zu können. Die Folgezeitlücke besteht aus verschiedenen Anteilen, bei Bremsvorgängen beispielsweise aus dem Sehen und Erkennen eines Ereignisses, dem Reagieren, dem Fuss aufs Bremspedal setzen sowie die technische Ansprechzeit der Bremsen.</p> <p>Die Kapazitätsbetrachtung ist aber auch abhängig von der Strassenhierarchie: Während auf Hochleistungsstrassen (Autobahnen, Autostrassen) die Kapazität vor allem durch Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen sowie durch die Stabilität des Verkehrsflusses definiert wird, sind auf dem untergeordneten Netz bei Stadtstrassen und Ortsdurchfahrten vor allem Knoten (z.B. Vorfahrtskreuzungen, Kreisell oder Lichtsignalanlagen) leistungsbestimmend.</p> <p>Hochleistungsstrassen</p> <p>Die in der Realität beobachteten Zeitlücken unterscheiden sich nach Fahrweise der Fahrerinnen und Fahrer. Untersuchungen für gesättigte Autobahnen in Deutschland weisen einen Mittelwert von 1.15–1.40 Sekunden auf (Friedrich und Wagner, 2015). Bereits heute wird dieser Wert aber von einzelnen aggressiv fahrenden Lenkerinnen und Lenkern unterschritten. Gemäss Gesetz muss im Strassenverkehr eine Zeitlücke von min-</p>				

¹ Perret F., Arnold T., Fischer R., de Haan P., Haefeli U. (2020). Automatisiertes Fahren in der Schweiz: Das Steuer aus der Hand geben? In TA-SWISS Publikationsreihe (Hrsg.): TA 71/2020. Zürich: vdf.

destens 0.9 Sekunden eingehalten werden, die Empfehlung beträgt jedoch 2.0 Sekunden. Die Faustregel, wonach der räumliche Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug «der halbe Tacho in Metern» betragen soll, entspricht einer Folgezeitlücke von 1.8 Sekunden.

Heutige Folgezeitlücken könnten durch automatisierte Systeme theoretisch um die menschlichen Zeitanteile in Bezug auf Sehen und Erkennen von Ereignissen, Reaktions- und Fussumsetzzeit reduziert werden. Dabei hat auch die Vernetzung der Fahrzeuge einen Einfluss: Je besser und schneller die Informationen zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden, desto kleinere Zeitlücken sind möglich. Experten schätzen für automatisierte und vernetzte Fahrzeuge auf Autobahnen minimale Zeitlücken von 0.3–0.9 Sekunden (Wagner, 2015; Fellendorf, 2017). Zudem dürften die Zeitlücken durch die Automatisierung resp. Vernetzung einheitlicher werden und damit geringere Streuungen aufweisen. Auf Autobahnen werden zudem schnellere Fahrstreifenwechsel (kooperatives Verhalten) und homogenere Geschwindigkeiten erwartet (Krause et al., 2017).

Stadt- und Ortsstrassen

An Knoten mit Lichtsignalanlagen fahren Menschen bereits heute antizipiert, sprich sie halten geringere Zeitlücken zum vorderen Fahrzeug ein, damit sie die Knoten schneller passieren können. Für städtische Knoten in Deutschland schätzt Friedrich (2015) für menschlich gesteuerte Fahrzeuge einen Mittelwert von ca. 0.6 Sekunden. Dieser könnte durch die Automatisierung auf 0.3–0.5 Sekunden reduziert werden (Friedrich und Wagner, 2015). Zudem dürften automatisierte Fahrzeuge insbesondere an Knoten aus dem Stand einheitlicher und schneller beschleunigen, sodass mehr Fahrzeuge pro Zeiteinheit die Knoten passieren können.

Kapazitätseffekte

Die Kapazität ist definiert als grösste Verkehrsstärke (Anzahl Fahrzeuge pro Stunde), die ein Verkehrsstrom an einem bestimmten Strassenquerschnitt erreichen kann. Können die tatsächlichen Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen infolge der Automatisierung und Vernetzung reduziert werden, erhöht sich die maximale Verkehrsstärke und damit die Kapazität einer Strecke. Die Zunahme verhält sich überproportional zum Anteil automatisierter Fahrzeuge (vgl. Abbildung nach Friedrich, 2015). Maximalwerte für Kapazitätserhöhungen werden erreicht, wenn alle Fahrzeuge automatisiert und vernetzt sind. Im Mischverkehr von automatisierten und nicht automatisierten Fahrzeugen fallen die Kapazitätseffekte deutlich geringer aus.

Deutlich zurückhaltender sind beispielsweise Calvert et al. (2017): Sie gehen davon aus, dass die Verbreitung von SAE-Stufen für viele Jahre heterogen sein wird und argumentieren, dass insbesondere das Vorhandensein von tieferen Automatisierungsstufen die Kapazität verringert. Erst mit Anteilen von über 70% vollautomatisierter Fahrzeuge dürften Verbesserungen des Verkehrsflusses auftreten.

Forschungsergebnisse für Hochleistungsstrassen

Zu den maximalen Kapazitätseffekten liegen verschiedenste Abschätzungen und Simulationsresultate vor. Die Angaben für Autobahnen reichen von sehr optimistischen Werten von +500% (Hermann, 2018), +270% (Tientrakool et al., 2011) über mittlere Werte von rund +80% (Friedrich, 2016) bis hin zu deutlich geringeren Zunahmen (Krause et al., 2017). Eine besonders umfassende Simulationsstudie für Autobahnen (Fellendorf 2017) zeigt unter der Berücksichtigung der gesetzlich festgelegten Zeitlücke von 0.9 Sekunden für unterschiedliche Streckenabschnitte, Durchdringungsraten automatisierter Fahrzeuge, Geschwindigkeitsregimes, Schwerverkehrsanteilen sowie Verkehrsstromverhältnissen Kapazitätswirkungen in der Grössenordnung von 0 bis +30%.

Wie erwähnt sind diese Wirkungen direkt abhängig von den angenommenen Zeitlücken, die automatisierte Fahrzeuge einhalten können resp. dürfen. Diese Angaben sind jedoch noch nicht gesichert und auch von Annahmen zur Vernetzung der Fahrzeuge abhängig. Werden automatisierte Fahrzeuge in den früheren Zuständen aufgrund von Sicherheitsüberlegungen höhere mittlere Zeitlücken einprogrammiert, als dies heute der Fall ist, würde die Kapazität vorerst abnehmen (Krause et al., 2017).

Im schweizerischen Autobahnnetz sind die dichten Ein- und Ausfahrten und Verzwei-

	<p>gungen kapazitätsbestimmend. Auf diesen Abschnitten sind die Folgezeitlücken heute schon sehr gering und durch Automatisierung resp. Vernetzung nur noch geringfügig zu optimieren. Die Stabilität des Verkehrsflusses dürfte mit zunehmendem Anteil an automatisierten Fahrzeugen aber ansteigen. Bei hohen Verkehrsbelastungen könnte die Wahrscheinlichkeit für Verkehrszusammenbrüche resp. Staus so abnehmen. In einer amerikanischen Simulation kommunizieren Fahrzeuge und Infrastruktur miteinander, um den Verkehrsfluss auf der Interstate 66 in Virginia zu glätten. Eine Verkehrsleitzentrale kann bei 20% der Fahrzeuge eine Richtgeschwindigkeit vorgeben und damit die Gefahr, dass sich ein Stau bildet, nachweislich reduzieren. Ohne kooperative und adaptive Geschwindigkeitsregelung variierten die gemessenen Geschwindigkeiten zwischen 0 und 70 km/h, während mit dieser Technologie Werte zwischen 50 und 105 km/h erreicht wurden (Hermann, 2018).</p> <p>Forschungsergebnisse für Stadt- und Ortsstrassen</p> <p>In Städten besteht bei vollständiger Automatisierung ein theoretisches Potenzial für Kapazitätssteigerungen von rund 20–40% (Friedrich 2015). Aufgrund von zu berücksichtigenden Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmenden dürfte die Kapazitätswirkung in der Stadt aber grundsätzlich tiefer ausfallen als auf den Autobahnen. Das Wissen über die Interaktionen von automatisierten Fahrzeugen mit dem Fuss- und Veloverkehr sowie dem ÖV ist derzeit noch beschränkt und muss genauer erforscht werden.</p> <p>Weitere Studien sind den Wirkungen automatisierter Taxiflotten auf die Verkehrszustände in Städten gewidmet. Maciejewski et al. (2017) gehen von geringeren Zeitlücken und einem verbesserten Fahrverhalten an Knoten aus. Damit könnten grosse Taxiflotten positive Wirkungen auf den Verkehrsfluss in Städten haben.</p>
<p>Quellen</p>	<p>Calvert et al. (2017): Will Automated Vehicles Negatively Impact Traffic Flow? Journal of Advanced Transportation, Weblink</p> <p>Fellendorf (2017): Automatisierung im Mischverkehr – verkehrswissenschaftliche Erkenntnisse, Überlegungen zur Leistungsfähigkeit; TU Graz, Vortrag am ÖVG-Forum Automatisierung im Verkehr.</p> <p>Friedrich (2015): Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge; in Maurer et al. (Hrsg.), Autonomes Fahren, Springer, Berlin.</p> <p>Hermann (2018): Die autonome Revolution – Wie selbstfahrende Autos unsere Strassen erobern. Frankfurter Allgemeine Buch, Frankfurt am Main, 2018.</p> <p>Krause et al. (2017a): Mikroskopische Simulation von automatisierten Fahrzeugen zur Ermittlung der Wirkungen auf die Kapazität von Autobahnen; Technische Universität München; in Fachzeitschrift Strassenverkehrstechnik (Dezember 2017), FGSV Köln.</p> <p>Krause et al. (2017b): Impact of Automated Vehicles on Capacity of the German Free-way Network, Conference Paper; Technische Universität München.</p> <p>Maciejewski et al. (2017): Congestion effects of autonomous taxi fleets. Transport. Weblink</p> <p>Tientrakool et al. (2011): Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance, paper presented at the IEEE Vehicular Technology Conference.</p> <p>Wagner (2015): Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen; DLR Berlin; in Maurer et al. (Hrsg.), Autonomes Fahren, Springer, Berlin.</p>
<p>Situation im Ausland</p>	<p>Die Kapazitätseffekte von automatisierten Fahrzeugen sind ein grosses Versprechen dieser Technologie und werden deshalb weltweit intensiv erforscht. Aufgrund des breiten Spektrums von Annahmen und von möglichen Auswirkungen, findet derzeit eine Diskussion unter Wissenschaftlern statt. Bislang wird in den meisten Ländern davon ausgegangen, dass die Strassenkapazitäten infolge Automatisierung deutlich zunehmen. Verkehrstechnische Aspekte sind global gültig, weshalb sich Experten aus den USA und Europa regelmässig austauschen, insbesondere zur mathematischen Modellierung.</p> <p>Das deutsche Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) fördert die Erprobung von Technologien zum automatisierten und vernetzten Fahren im Rah-</p>

	<p>men von digitalen Testfeldern auf Autobahnen (A9 in Bayern) und in Städten (z.B. Berlin, Braunschweig, Dresden, Düsseldorf, Hamburg, Ingolstadt, München). Zudem wurde ein digitales Testfeld Deutschland-Frankreich-Luxemburg vereinbart. Ziel ist es, die positiven Wirkungen auf Verkehrssicherheit, Effizienz und Emissionen nachzuweisen. Dabei werden Auswertungen von Kapazitätseffekten in der Realität möglich. Ähnlich zur A9 wird auch in Österreich auf der A2 eine Teststrecke definiert (ALP.Lab).</p>
<p>Situation und Handlungsspielraum der Schweiz</p>	<p>Positive Kapazitätseffekte ergeben sich durch automatisierte Fahrzeuge v.a. dann, wenn die zeitlichen Abstände zwischen diesen Fahrzeugen geringer sind als bei menschlich gesteuerten Fahrzeugen. Dabei sind kürzere Reaktionszeiten wesentlich.</p> <p>Die Schweiz kann hierzu bessere Kenntnisse über das tatsächliche Folgeverhalten automatisierter Fahrzeuge erwerben, insbesondere für leistungsbestimmende Anschlüsse und Verflechtungszonen. Dies kann beispielsweise über die Ermöglichung entsprechender Forschung und/oder – unter Einbezug von Fahrzeugherstellern – Testfelder wie im Ausland erfolgen. Auf dieser Basis können zusätzliche Anforderungen in die international geregelte Fahrzeugzulassung eingebracht und/oder zusätzliche nationale Anforderungen formuliert werden, beispielsweise dass unter Einhaltung von Sicherheitsstandards nur Fahrzeuge mit positiven Wirkungen in Bezug auf die Leistungsfähigkeit des Verkehrsnetzes zugelassen werden.</p> <p>Zu den bisher schwach erforschten Interaktionen von automatisierten Fahrzeugen mit dem Fuss- und Veloverkehr sowie dem ÖV müssen Erkenntnisse über die Fähigkeiten und Grenzen von Fahrzeugsystemen gesammelt werden, die ebenfalls bei der international geregelten Fahrzeugzulassung einzubringen sind. In Innenstädten und Agglomerationen können hierzu beispielsweise Pilotversuche von automatisierten Fahrzeugen ermöglicht, begleitet und ausgewertet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass verschiedene technologische Ansätze unterschiedlicher Hersteller getestet werden, um das Fahrzeugverhalten möglichst breit beobachten zu können.</p>