

Automatisierte Fahrzeuge: Effekte und Einsatz unter Berücksichtigung der Heterogenität von Straßenräumen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DISSERTATION

Automatisierte Fahrzeuge: Effekte und Einsatz unter Berücksichtigung der Heterogenität von Straßenräumen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften Raumplanung und Raumordnung unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Martin Berger
E280-05

Forschungsbereich Verkehrssystemplanung (MoVe)

Begutachtung durch

Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz

Prof. Dr.-Ing. Uwe Plank-Wiedenbeck

**eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung**

von

Aggelos Soteropoulos

0927233



Diese Dissertation ist im Rahmen des Forschungsprojekts „AVENUE21 – Autonomer Verkehr: Entwicklungen des urbanen Europa“, welches durch die Daimler und Benz Stiftung gefördert wurde, entstanden.

**Daimler und
Benz Stiftung**

Kurzfassung

Automatisierte Fahrzeuge könnten in den nächsten Jahren und Jahrzehnten die Mobilität – so wie wir sie heute kennen – grundlegend verändern. Während der Diskurs zum automatisierten Fahren jedoch noch bis vor ein paar Jahren durch eine regelrechte Euphorie geprägt war, wird die Thematik spätestens seit dem Beginn der COVID-19-Pandemie pessimistischer eingeschätzt. Zunehmend wird deutlich, dass die Entwicklung der Technologie und deren ubiquitärer Einsatz noch Zeit benötigen wird und automatisierte Fahrzeuge in naher Zukunft nur in technologisch geeigneten oder in schrittweise freigegebenen Teilen des Straßennetzes eingesetzt werden können. Die spezifischen Umfeldbedingungen – und dazu gehören auch die Gestalt und Eigenschaften des Straßenraums – spielen hierbei eine wichtige Rolle für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge. Unbestritten ist jedoch, dass durch automatisierte Fahrzeuge umfangreiche Wirkungen auf Mobilität und Siedlungsentwicklung zu erwarten sind. Auch diese gilt es jedoch verstärkt vor dem Hintergrund sehr unterschiedlicher Straßenräume zu betrachten.

Das kumulative Dissertationsprojekt beschäftigt sich aus mehreren Perspektiven mit den Wirkungen automatisierter Fahrzeuge und deren Einsatz aus Sicht der Stadt- und Verkehrsplanung. Es rückt hierbei – vor dem Hintergrund des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge in naher Zukunft – jedoch die Ebene des Straßenraums, insbesondere dessen Heterogenität bzw. Vielfalt, die in vielen Städten anzutreffen ist, in den Fokus. Die Dissertation bildet dabei wichtige Grundlagen und entwickelt Analyse- bzw. Bewertungsverfahren dahingehend, wie die Wirkungen automatisierter Fahrzeuge besser verstanden werden können und automatisierte Fahrzeuge bestmöglich, im Sinne bestehender Strategien in der Stadt- und Verkehrsplanung eingesetzt und deren Chancen genutzt werden können.

Hierzu werden im Rahmen der Dissertation verschiedene Methoden eingesetzt. Um die prinzipiellen verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge aufzuzeigen, zu untersuchen und besser zu verstehen, wird ein umfangreiches systematisches Literaturreview von Modellierungsstudien durchgeführt. Ausgehend davon erfolgen am Beispiel der Stadt Wien anschließend GIS-basierte Analysen und Bewertungen hinsichtlich der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge sowie bezüglich der Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen in Straßenräumen – und damit spezifisch stärker räumlich differenzierte Betrachtungen.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen insgesamt auf, dass die Wirkungen automatisierter Fahrzeuge von verschiedenen Einflussgrößen abhängig sind, jedoch unvorteilhafte verkehrliche und räumliche Wirkungen ohne begleitende Maßnahmen auftreten werden: Automatisierte Fahrzeuge (privat genutzt oder als Sharing-Angebot) werden überwiegend mit einer Zunahme der Verkehrsleistung, d.h. gefahrene Fahrzeugkilometer verbunden und insbesondere private automatisierte Fahrzeuge führen ebenso zu einem tendenziell dispersem Stadtwachstum. Eine Reduktion des Verkehrsaufwands zeigt sich allein bei der Annahme eines sehr hohen Anteils von Ride-Sharing und damit eines hohen Besetzungsgrades. Folglich sollte der Einsatz von automatisierten Fahrzeugen als Ride-Sharing Service oder im Öffentlichen Verkehr angestrebt werden, wobei vor allem das Teilen von Fahrten forciert werden muss.

Hierbei gilt es speziell die Ebene des Straßenraums zu berücksichtigen und unter Beachtung einer unterschiedlich technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen sowie dem Umstand, dass sich die Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen in verschiedenen Straßenräumen unterscheiden wird, räumlich differenzierte Strategien für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge zu entwickeln. Ausgehend von den Analysen zur technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen sowie zur Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen in Straßenräumen zeigt sich, dass beispielsweise innerstädtische Bereiche aus technisch-infrastruktureller Sicht schlechter für automatisierte Fahrzeuge geeignet sind. Gleichfalls würden dort für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge auch aus Sicht der Verträglichkeit mehr zusätzliche, begleitende Maßnahmen benötigt werden als in Stadtrandbereichen, da innerstädtische Straßen grundsätzlich gegenüber einer weiteren Verkehrszunahme durch automatisierte Fahrzeuge sensibler sind als Stadträume am Stadtrand. Letztlich sollte nicht vergessen werden, dass Straßen neben dem Verkehr auch die Wohnbarkeit und die Funktionsfähigkeit von Städten sicherstellen müssen und auch im Fall des automatisierten Verkehrs die Optimierung der Straßen für Transportzwecke mit deren Nutzung als Lebens- und Aufenthaltsraum im Widerspruch stehen wird.

Abstract

Automated vehicles could fundamentally change current mobility in the coming years and decades. However, while the discourse on automated driving was characterized by predominant euphoria until a few years ago, recently the topic has been assessed more pessimistically – particularly since the beginning of the COVID-19 pandemic. It is becoming increasingly clear that the development of the technology and its ubiquitous use will still take time and that in the near future automated vehicles can only be used in technologically suitable parts of the street network or in parts that have been gradually released. The specific operating conditions – and this also includes the characteristics of the street space – play an important role for the use of automated vehicles. However, it is undisputed that automated vehicles can be expected to have extensive impacts on mobility and settlement development, but, these too must be considered against the background of very different street spaces.

The cumulative dissertation project deals with the impacts of automated vehicles and their use from the perspective of urban and transport planning. However, considering the use of automated vehicles in the near future, it focuses on the level of the street space, especially its heterogeneity or diversity, which can be found in many cities. The dissertation understands itself as an important basis and developer of evaluation methods and foundations in terms of how the impacts of automated vehicles can be better understood and how automated vehicles can be used in the best possible way and to exploit their opportunities with regard to existing strategies in urban and transport planning.

For this purpose, different methods are used within the dissertation. In order to investigate, demonstrate and better understand the principal transport and spatial effects of automated vehicles, a comprehensive systematic literature review is conducted. Based on this and using the example of the city of Vienna, GIS-based analyses and assessments are then carried out regarding the technical-infrastructure suitability of street spaces for automated vehicles as well as regarding the compatibility of automated vehicles in street spaces – and thus specifically more spatially differentiated analyses.

Overall, the results show that the effects of automated vehicles depend on various influencing variables, but that unfavorable transport and spatial effects are likely without accompanying measures: Automated vehicles (private or with sharing) are predominantly associated with an increase in vehicle kilometers travelled and in particular private automated vehicles are also leading to a more dispersed urban growth pattern. A reduction in vehicle kilometers travelled is evident only when assuming a very high share of ride-sharing and thus a high occupancy rate. Consequently, the use of automated vehicles as a ride-sharing service or in public transport should be aimed at, whereby the sharing of rides should be increased in particular. In this context, it is especially important to consider the level of the street space and to develop spatially differentiated strategies for the deployment of automated vehicles, taking into account the different technical-infrastructure suitability of street spaces as well as the fact that the compatibility of automated vehicles will differ in various street spaces. Based on the analyses of the technical-infrastructure suitability of street spaces as well as the compatibility of automated vehicles in street spaces, it can be seen that inner-city areas for example are less suitable for automated vehicles from a technical-infrastructure point of view and that, likewise from a compatibility point of view, more additional accompanying measures are needed for the

deployment of automated vehicles there compared to areas in the outskirts, since streets in inner-city areas are generally more sensitive to a further increase in traffic volume due to automated vehicles than areas in the outskirts. Ultimately, it should not be forgotten that, in addition to transport, streets must also ensure the habitability and functionality of cities and that, even in the case of automated transport, the optimization of streets for transport purposes will conflict with their use as living and recreational spaces.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wäre ohne zahlreiche Personen so nicht möglich gewesen. Allen voran möchte ich mich bei Martin Berger bedanken, der mir nicht nur im Rahmen dieser Dissertation fachlich zur Seite stand, sondern auch darüber hinaus eine große Unterstützung einnahm. Er machte den Alltag als Mitarbeiter an der Technischen Universität Wien zu einer sehr lehrreichen Erfahrung.

Zudem möchte ich mich bei allen meinen KollegInnen des Forschungskollektivs AVENUE21 bedanken, dessen Teil ich die letzten 4 1/2 Jahre sein durfte. Besonders Mathias Mitteregger, Emilia Bruck, Andrea Stickler, Jens S. Dangschat, Rudolf Scheuvs, Ian Banerjee und Jonathan Fetka waren für mich wegweisend. Doppelter Dank gilt Mathias Mitteregger für seine fachlichen Inputs für die in dieser Dissertation enthaltenen Artikel sowie Emilia Bruck und Andrea Stickler für die Lektorierung der Artikel sowie der Rahmenschrift. Ein Dank für ihre fachlichen Inputs gebührt ebenso Francesco Ciari und Jakob Zwirchmayr.

Die MitarbeiterInnen des Forschungsbereichs für Verkehrssystemplanung, Linda Dörrzapf, Fabian Dörner, Christoph Kirchberger, Vanessa Sodl und Aurelia Kammerhofer waren ebenfalls stets eine große Unterstützung.

Zudem möchte ich mich auch noch bei den KollegInnen vom Forschungsbereich für Stadt- und Regionalforschung, Robert Kalasek, Florian Pühringer und Hans Kramar, der mir das Feld der Mobilitätsforschung eröffnete, bedanken.

Der aber wohl größte Dank gilt meinen Eltern, die mich seit Anfang des Studiums mit großem Zuspruch und Verständnis begleiten und immer da sind, wenn ich sie brauche.

Zuletzt noch Danke an meine Frau Anna, die mich in der Zeit der Erstellung der Arbeit sowohl unterstützt, als auch hin und wieder abgelenkt hat.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	15
1.1.	Inhalte, Ziele der Arbeit und Forschungsfragen.....	17
1.2.	Aufbau der Arbeit.....	18
1.3.	Abgrenzung.....	20
2.	Stand der Forschung	23
2.1.	Automatisiertes Fahren: Technologische Entwicklungen und aktueller Entwicklungsstand	23
2.2.	Automatisiertes Fahren im Kontext von Mobilität, Verkehrsinfrastruktur- und Siedlungsentwicklung	27
2.2.1.	<i>Mobilitätsinnovationen, Verkehrsinfrastruktur- und Siedlungsentwicklung</i>	27
2.2.2.	<i>Automatisiertes Fahren als neue technologische Mobilitätsinnovation</i>	28
2.2.3.	<i>Die Relevanz des Straßenraums</i>	30
2.2.4.	<i>Zusammenschau und Einbettung der unterschiedlichen Perspektiven und Artikel</i>	32
3.	Forschungsdesign und Methodik	35
3.1.	Systematisches Literaturreview von Modellierungsstudien zu verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge	35
3.2.	GIS-basierte Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge	36
3.3.	GIS-basierte Bewertung der straßenräumlichen Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen mittels des Kompensatorischen Ansatzes	37
4.	Verkehrliche und räumliche Wirkungen automatisierter Fahrzeuge	39
4.1.	Impacts of automated vehicles on travel behavior and land use: an international review of modelling studies	40
4.1.1.	Introduction	42
4.1.2.	Study characteristics	44
4.1.2.1.	<i>Study characteristics</i>	44
4.1.2.2.	<i>Scenarios/variables and model assumptions</i>	44
4.1.2.3.	<i>Indicators</i>	45
4.1.3.	Results of the studies	51
4.1.3.1.	<i>Impacts on travel behavior</i>	51
4.1.3.1.1.	Vehicle miles travelled (VMT)/vehicle kilometers travelled (VKT).....	51
4.1.3.1.2.	Mode/modal share.....	51
4.1.3.1.3.	Vehicle hours travelled (VHT).....	52
4.1.3.2.	<i>Impacts on travel behavior</i>	52
4.1.3.2.1.	Parking Spaces (including number of vehicles to process the travel demand – fleet size).....	52
4.1.3.2.2.	Location choices of people and firms.....	53
4.1.3.3.	<i>Influence of results by model assumptions</i>	54
4.1.4.	Conclusion and recommendations for future research	55
4.1.5.	References	57
5.	Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge	61
5.1.	Automated drivability: Toward an assessment of the spatial deployment of level 4 automated vehicles	62
5.1.1.	Introduction	64
5.1.2.	Automated driving systems	66
5.1.2.1.	<i>Perception</i>	67

5.1.2.2.	<i>Planning</i>	67
5.1.2.3.	<i>Control</i>	68
5.1.3.	Urban street spaces	68
5.1.4.	The framework for the assessment of automated drivability: components, challenges for ADSs and possible indicators	69
5.1.4.1.	<i>Framework components and challenges for ADS</i>	70
5.1.4.1.1.	Number of objects within the street space.....	70
5.1.4.1.2.	Diversity of objects within the street space.....	72
5.1.4.1.3.	Condition and configuration of the road infrastructure.....	72
5.1.4.1.4.	Speed limit.....	73
5.1.4.1.5.	Stability of the ODD.....	73
5.1.4.2.	<i>Indicators for representing the framework components and challenges for ADSs</i>	74
5.1.5.	Assessment of the automated drivability for the city of Vienna, Austria	78
5.1.5.1.	<i>Data: Road network and street segmentation</i>	78
5.1.5.2.	<i>Indicators selection and calculation</i>	78
5.1.5.2.1.	Number of objects within the street space.....	79
5.1.5.2.2.	Diversity of objects within the street space.....	79
5.1.5.2.3.	Condition and configuration of the road infrastructure.....	81
5.1.5.2.4.	Speed limit.....	82
5.1.5.2.5.	Stability of the ODD.....	82
5.1.5.3.	<i>Indicators integration</i>	82
5.1.5.4.	<i>Results</i>	85
5.1.6.	Assessment of the automated drivability for the city of Vienna, Austria	87
5.1.7.	References	91
6.	Straßenräumliche Verträglichkeit unter Berücksichtigung der verkehrlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge	97
6.1.	Compatibility of Automated Vehicles in Street Spaces: Considerations for a Sustainable Implementation	99
6.1.1.	Introduction	101
6.1.2.	Related Works	102
6.1.3.	Method	104
6.1.3.1.	<i>Data: Street Network and Street Segmentation</i>	104
6.1.3.2.	<i>Scenarios of AVs Modeled in MATSim</i>	104
6.1.3.3.	<i>Measuring the Compatibility of AVs in Street Spaces</i>	107
6.1.3.3.1.	Determining the Maximum Compatible Traffic Volume.....	107
6.1.3.3.2.	Adapting the Maximum Compatible Traffic Volume Based on Further Characteristics.....	109
6.1.3.3.3.	Comparison between Actual Traffic Volume and Adapted Maximum Compatible Traffic Volume.....	114
6.1.4.	Results	115
6.1.4.1.	<i>Street-Level Changes in Traffic Volume at Peak Hour</i>	115
6.1.4.2.	<i>Assessment of the Compatibility of Street Spaces</i>	116
6.1.4.3.	<i>Sensitivity Analysis</i>	117
6.1.4.4.	<i>Sensibility of the Compatibility with Increased Traffic in Street Spaces and Interlinking with the Technical-Infrastructural Suitability of Street Spaces for AVs</i>	119
6.1.5.	Discussion	121
6.1.6.	Conclusions and Recommendations for Further Research	124
6.1.7.	Appendix	127
6.1.8.	References	129
7.	Zusammenfassung und Diskussion der zentralen Erkenntnisse	135
8.	Reflexion der Ergebnisse, Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	143
8.1.	Reflexion der Ergebnisse	143
8.2.	Empfehlungen	145
8.3.	Limitationen	147

8.4. Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	150
9. Literaturverzeichnis	153

1. Einleitung

Automatisiertes Fahren, so scheint es, ist nicht mehr nur Fantasie und Fiktion, sondern könnte in den nächsten Jahren und Jahrzehnten die Mobilität – so wie wir sie heute kennen – grundlegend verändern. Mit dem automatisierten Fahren werden jedoch nicht nur Auswirkungen auf die Mobilität und den damit verbundenen Wirtschaftszweigen, wie beispielsweise die Automobilindustrie verbunden (vgl. Bormann et al. 2018: 12, Brenner & Herrmann 2018: 427). Vielmehr bedingt es viel weitgreifendere Auswirkungen auf zahlreiche Bereiche und schließlich die gesamte Gesellschaft. Ein solcher Wandel des Mobilitätssystems könnte ähnlich gravierende räumliche und soziale Folgen haben wie jener des Automobils vor etwa 70 Jahren (vgl. Mitteregger et al. 2020: VIII). Automatisiertes Fahren ist jedoch nicht der einzige Trend, der dazu führt, dass das Mobilitätssystem und die Mobilitätswirtschaft eine umfassende Transformation durchläuft: Auch die zunehmende Elektrifizierung und Vernetzung von Fahrzeugen, Sharing, also das Teilen von Fahrzeugen, sowie die Zunahme von Mobilitätsdienstleistungen (Mobility as a Service) bestimmen den Wandel des Mobilitätssystems und damit ebenso dessen Auswirkungen auf andere Bereiche und Sektoren (vgl. Bormann et al. 2018: 5; Schuh et al. 2019: 3).

Im Laufe der Arbeit an dieser Dissertation zeigte sich sowohl im medialen als auch im politischen und wissenschaftlichen Bereich ein deutlicher Bedeutungszuwachs, ja fast schon ein Hype hinsichtlich des Themas automatisiertes Fahren (vgl. Fraedrich 2017: 1). Zwar ist die Idee des automatisierten Fahrens schon älter und bereits in den 1980er und 1990er Jahren gab es Versuche und Tests rund um das automatisierte Fahren von Fahrzeugen (vgl. Campbell et al. 2010, Dickmanns 2002). Besondere Bedeutung erlangte das automatisierte Fahren aber dann mit der DARPA¹ Urban Challenge im Jahr 2007 und schließlich Anfang der 2010er Jahre durch das „self-driving car“-Projekt von Google im Silicon Valley (vgl. Teoh & Kidd 2017: 57). Waren es vormals allein Automobilfirmen (z.B. Daimler im Projekt PROMETHEUS oder bei der Befahrung der Bertha-Benz-Route), die sich mit der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge befassten (vgl. Ziegler et al. 2014), wird die Entwicklung nun ebenso bzw. vor allem durch IT-Unternehmen, wie Google/Waymo, Apple sowie durch mit viel Risikokapital ausgestatteten Start-Ups, wie Cruise (nun von GM gekauft), Zoox (nun von Amazon gekauft) oder Voyage (nun von GM/Cruise gekauft) charakterisiert, wobei in jüngster Zeit auch eine gewisse Konsolidierung im Markt erkennbar ist (vgl. Beiker 2015: 198, Bormann et al. 2018: 12; Hawkins 2021). Durch die enormen Fortschritte bei der Technologieentwicklung war der Diskurs zum automatisierten Fahren besonders Mitte der 2010er Jahre sehr positiv geprägt, eine regelrechte Technikeuphorie (vgl. Fraedrich 2017: 1) war zu spüren. Prognosen gingen häufig davon aus, dass automatisierte Fahrzeuge relativ rasch – meist wurde hierbei auch das Jahr 2020 genannt – in Form von Level 5-Fahrzeugen (siehe Kapitel 2) zur Verfügung stehen, also dass man mit ihnen immer und überall hinfahren kann, und suggerierten damit den Traum vom automatisierten Fahren, der bereits seit den 1970er Jahren geträumt wird.

Gegenüber dem anfänglichen Hype zeigt sich jedoch insbesondere seit dem Jahr 2019 eine deutlich gebremste Euphorie; die technologische Entwicklung wird weitaus pessimistischer eingeschätzt und auch das Interesse zum Thema automatisiertes Fahren hat eher

¹ Defense Advanced Research Projects Agency

abgenommen – was sich speziell in Bezug auf das mediale Interesse durch die COVID-19-Pandemie noch verschärft hat (Abbildung 1). Zwar ist die öffentliche Wahrnehmung zum automatisierten Fahren noch immer weitestgehend von automatisierten Fahrzeugen geprägt, die immer und überall fahren können; von der Fachwelt wird ein „revolutionäres Szenario“, in dem es einem Marktakteur gelingt, abrupt ein Fahrsystem zu entwickeln, das überall allen Fahraufgaben gewachsen ist, die auch menschliche FahrerInnen bewältigen (vgl. Beiker 2015), jedoch heute weitestgehend ausgeschlossen. Erwartet wird eine ausgedehnte Phase des Übergangs, während der automatisierte Fahrzeuge nur in technologisch geeigneten oder in schrittweise freigegebenen, d.h. begrenzten Teilen des Straßennetzes eingesetzt werden können (vgl. Axhausen et al. 2020: 10, Mitteregger et al. 2020, Perret et al. 2017).



Abbildung 1: Weltweite Entwicklung der Popularität des Themas Automatisiertes Fahren anhand der Häufigkeit von Suchanfragen zum Begriff "autonomous driving" in Google (Google Trends) im Zeitraum zwischen Februar 2011 und Februar 2021, Quelle: <https://trends.google.de/trends/explore?date=2011-02-01%202021-02-01&q=autonomous%20driving>

Weitgehende Einigkeit besteht jedoch darin, dass automatisierte Fahrzeuge umfangreiche Auswirkungen auf den Verkehr und die Siedlungsstruktur erwarten lassen, so wie dies auch bereits frühere technologische Mobilitätsinnovationen getan haben. Im Mobilitätsbereich sind in den nächsten Jahren und Jahrzehnten durch das automatisierte Fahren hochdynamische Entwicklungen mit grundlegenden Veränderungen und Umbrüchen zu erwarten, die – wie es sich bereits bei früheren Technologien gezeigt hat – sowohl Chancen als auch Risiken für die zukünftige Mobilität sowie auch unsere Städte und Lebensräume mit sich bringen werden (vgl. Soteropoulos et al. 2019: 12). Aus Sicht der Verkehrs-, Infrastruktur- und Stadtplanung braucht es daher Strategien, ob, wo und wie automatisierte Fahrzeuge bestmöglich eingesetzt werden, aber auch entsprechende Entscheidungsgrundlagen für die Entwicklung dieser Strategien.

Konzentrierte sich die Forschung anfänglich vor allem auf die technologische Entwicklung automatisierter Fahrzeuge, wurden in den letzten Jahren zum Teil auch Studien zu den Wirkungen automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsfluss, die Verkehrsnachfrage und Siedlungsentwicklung sowie auch zu den erweiterten Wirkungen auf Gesellschaft und Umwelt durchgeführt (vgl. Milakis et al. 2017). Nur allmählich bilden sich daher erst die Entscheidungsgrundlagen für politische Handlungsstrategien zum Einsatz automatisierter Fahrzeuge heraus. Grundsätzliche, prinzipielle verkehrliche und räumliche Wirkweisen automatisierter Fahrzeuge konnten zwar bereits aufgezeigt werden, jedoch bestehen diese Wirkweisen aus einem komplexen Gefüge unterschiedlicher Einflussgrößen. Hier fehlen bislang detaillierte und auch differenzierte Analysen, anhand derer die Entscheidungsgrundlagen für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge aus der Sicht der Verkehrs-, Infrastruktur- und Stadtplanung auf eine möglichst breite und vollständige Basis gestellt werden können, sodass auch entsprechende Handlungsstrategien für den bestmöglichen Einsatz automatisierter Fahrzeuge entwickelt werden können. Diese

Entscheidungsgrundlagen sind jedoch von besonderer Relevanz, da bereits heute die Stellschrauben für die Entwicklung und den zukünftigen Einsatz automatisierter Fahrzeuge gesetzt werden.

Die vorliegende Arbeit versucht genau in diese Kerbe einzuschlagen. Sie richtet erstmals eine umfassende Perspektive darauf, welche verkehrlichen und räumlichen Wirkungen mit automatisierten Fahrzeugen zu erwarten sind und wie diese Wirkungen sowie ihre Ausprägungen mit unterschiedlichen Einflussgrößen zusammenhängen. Gleichfalls stellt sie die Ebene des Straßenraums, die in den bisherigen Studien zu potentiellen verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge nur unzureichend berücksichtigt wurde, in den Fokus. Hierbei beleuchtet die Arbeit spezifisch die Relevanz des Straßenraums vor dem Hintergrund der technisch-infrastrukturellen Eignung für automatisierte Fahrzeuge sowie der Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen aufgrund der mit ihnen intendierten verkehrlichen Wirkungen. Diese interdisziplinäre Betrachtung im Schnittpunkt von Technologie, Verkehrs-, Infrastruktur- und Stadtplanung findet sich auch im Forschungsprojekt „Avenue21 – Autonomer Verkehr: Entwicklungen des urbanen Europa“, in dessen Rahmen diese Dissertation entstanden ist.

1.1. Inhalte, Ziele der Arbeit und Forschungsfragen

Bei der vorliegenden Promotionsschrift handelt es sich um eine kumulative Dissertation. Den wesentlichen Kern der Arbeit bilden drei, bereits in internationalen, anerkannten wissenschaftlichen Zeitschriften mit Peer-Review-Verfahren veröffentlichte wissenschaftliche Aufsätze (Kapitel 4, 5 und 6). Da alle drei Aufsätze in englischsprachigen wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht wurden, ist die Arbeit teilweise in Englisch verfasst. Die Entscheidung der Verfassung einer kumulativen Dissertation erfolgte bewusst und gründet sich in der Aktualität des Themas: Wie oben dargelegt befindet sich das Thema in einem ständigen Wandel und entwickelt sich stetig weiter. Die Ergebnisse von Analysen und Untersuchungen unterliegen daher einer gewissen Halbwertszeit. Als Bestandteil einer klassischen Monografie hätten sie so nur bedingt zum wissenschaftlichen Erkenntnisfortschritt und zur wissenschaftlichen Kommunikation beitragen können. Hinzu kommt, dass die wissenschaftliche Kommunikation aktuell vor allem über den Austausch in wissenschaftlichen Aufsätzen in Fachzeitschriften läuft (vgl. Fraedrich 2017: 4).

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, einen Beitrag dazu zu schaffen, aufzeigen,

- 1) welche grundsätzlichen Wirkungen mit dem automatisierten Fahren für Städte im Bereich von Mobilität und Siedlungsstruktur zu erkennen bzw. zu erwarten sind,
- 2) wie die technologischen Komponenten bzw. die Funktionsweise eines automatisierten Fahrzeuges und die räumliche Umgebung zusammenwirken, in welcher Form also bestimmte Straßenräume aus technisch-infrastruktureller Sicht für automatisiertes Fahren geeignet oder weniger geeignet sind und
- 3) wie sich die Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen in Straßenräumen unter Berücksichtigung der mit ihnen verbundenen Wirkungen hinsichtlich der Verkehrsleistung bewerten lässt und in welchen Straßenräumen automatisierte Fahrzeuge eher oder weniger mit den Ansprüchen der NutzerInnen und Umfeldnutzungen verträglich sind.

Die Erarbeitung dieser Grundlagen und auch die dafür entwickelten Bewertungsmethoden und -verfahren sind insbesondere für die Stadt-, Verkehrs- und Infrastrukturplanung unerlässlich, um das Phänomen und die Wirkungen automatisierter Fahrzeuge zu verstehen und letztendlich Strategien für deren Einsatz zu formulieren.

Warum bereits heute ein entsprechendes Verständnis darüber wichtig ist, lässt sich sehr gut am Beispiel der technologischen Entwicklung aufzeigen: Die heutigen Einsatzumgebungen von Tests automatisierter Fahrzeuge entscheiden darüber, welche Lerneffekte bzw. Erfahrungen sich in den genutzten Algorithmen von automatisierten Fahrsystemen festigen bzw. einschreiben und in welchen Bereichen automatisierte Fahrzeuge somit in Zukunft eher eingesetzt werden können. Bereits mit der Freigabe von Tests bzw. mit der Festlegung von Testgebieten werden somit die Stellschrauben für die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge gesetzt. Ein Verständnis und umfangreiche Entscheidungsgrundlagen hinsichtlich differenzierter verkehrlicher und räumlicher Wirkweisen automatisierter Fahrzeuge gerade auch im Zusammenhang mit der Größe des Straßenraums sind hierbei von wesentlicher Bedeutung. Denn folglich wird es darum gehen, automatisierte Fahrzeuge in jenen Gebieten zu testen, die aus Sicht der Stadt-, Verkehrs- und Verkehrsinfrastrukturplanung einen Mehrwert bringen und somit bereits heute die Pfadabhängigkeit bei der technologischen Entwicklung automatisierter Fahrzeuge in die richtige, eine für alle VerkehrsteilnehmerInnen zufriedenstellende Richtung zu bringen.

Die vorliegende Arbeit schafft hierzu einen Beitrag, indem drei übergeordnete Themen und Forschungsfragen behandelt werden:

- *Fragestellung 1: Welche verkehrlichen und räumlichen Wirkungen sind durch automatisierte Fahrzeuge zu erwarten?*
- *Fragestellung 2: Wie lässt sich die technisch-infrastrukturelle Eignung von Straßenräumen für das automatisierte Fahren bewerten?*
- *Fragestellung 3: Wie lässt sich die Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen in Straßenräumen unter Berücksichtigung der mit ihnen verbundenen Wirkungen bewerten?*

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden im Rahmen der drei Aufsätze unterschiedliche Methoden eingesetzt. Einen näheren Überblick über die eingesetzten Methoden zur Beantwortung der Forschungsfragen wird in Kapitel 3 gegeben.

1.2. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beginnt zunächst mit den Grundlagen und dem Stand der Forschung, in welchen sich die Arbeit einbettet (**Kapitel 2**). Hierin wird das automatisierte Fahren und eine Systematik der Effekte im Hinblick auf Verkehr und Siedlungsentwicklung und die Verknüpfung zu den technischen Komponenten des automatisierten Fahrens sowie die Rolle des Straßenraums beschrieben. Zudem wird dargestellt, wie sich die drei Artikel in dieses Verständnis einbetten und wie diese zusammenhängen.

Kapitel 3 erläutert dann das Forschungsdesign und enthält eine Beschreibung der Methoden, die für die Beantwortung der Fragestellungen angewendet wurden.

Anschließend werden im ersten Artikel „Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies“ (**Kapitel 4**) die mit automatisierten Fahrzeugen implizierten Wirkungen auf das Mobilitätsverhalten und die Siedlungsentwicklung näher beschrieben und auch diskutiert, welche Einflussgrößen hierbei relevant sind und welche Aspekte in der derzeitigen Betrachtung noch weitestgehend unberücksichtigt bleiben. Ein Aspekt ist dabei die geringe Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen der Ebene des Straßenraums und den technologischen Komponenten automatisierter Fahrzeuge. Daher wird im zweiten Artikel „Automated Drivability: toward an assessment of the spatial deployment of level 4 automated vehicles“ (**Kapitel 5**) die Bewertung von Straßenräumen für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge thematisiert und am Beispiel der Stadt Wien untersucht, wo automatisierte Fahrzeuge aus technisch-infrastruktureller Sicht eher zum Einsatz kommen könnten und die in Kapitel 4 beschriebenen Wirkungen auf Mobilität und Siedlungsentwicklung somit eher zum Tragen kommen.

Der dritte Artikel „Compatibility of automated vehicles in street spaces: considerations for a sustainable implementation“ (**Kapitel 6**) untersucht, wie die Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen für unterschiedliche Straßenräume bewertet werden kann und zeigt wiederum am Beispiel der Stadt Wien auf, inwieweit automatisierte Fahrzeuge mit den Ansprüchen von NutzerInnen und Umfeldnutzungen in unterschiedlichen Straßenräumen verträglich sind.

Kapitel 7 bezieht die Ergebnisse der einzelnen Artikel aufeinander, fasst die zentralen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und diskutiert diese.

Abschließend erfolgt in **Kapitel 8** eine Reflexion der Ergebnisse, ein Ausblick und die Ableitung von Empfehlungen sowie eine Beschreibung und Darstellung des weiteren Forschungsbedarfs.

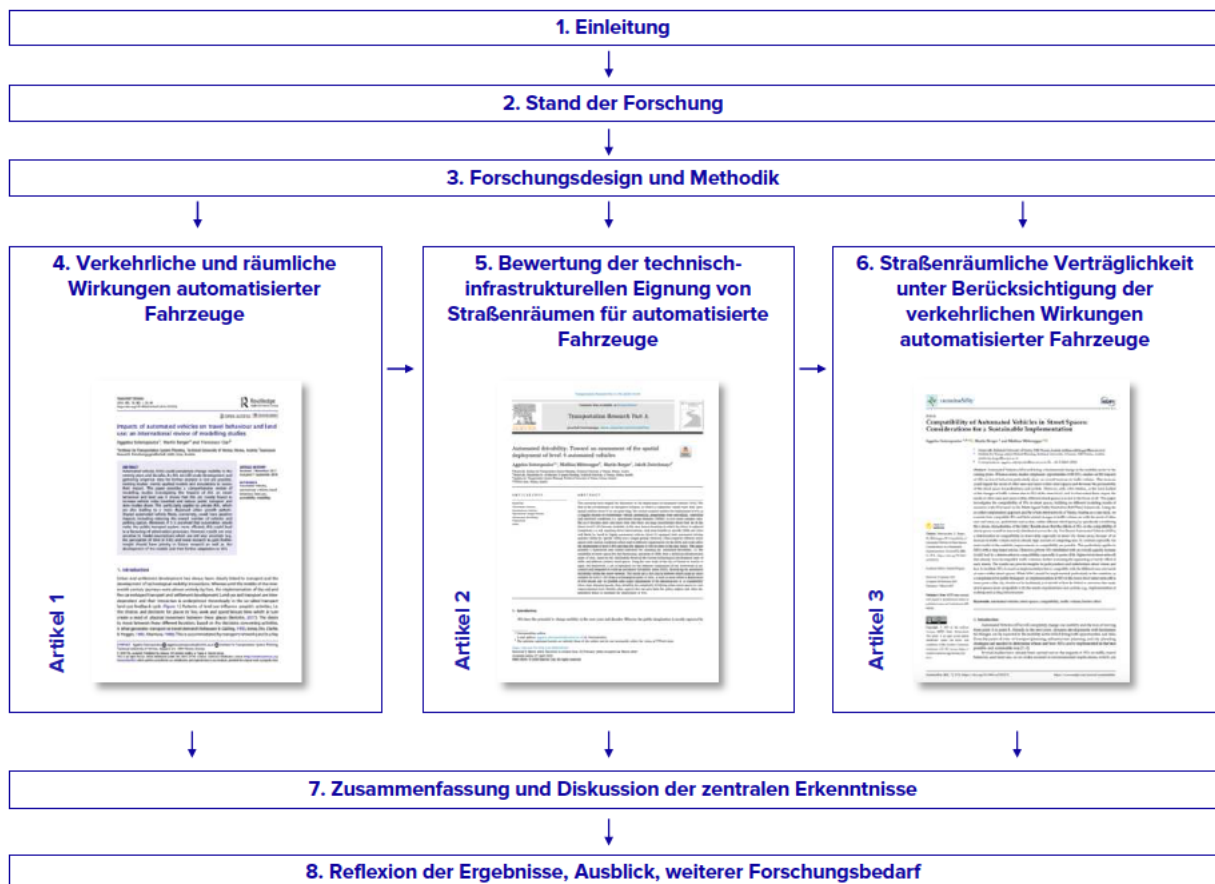


Abbildung 2: Überblick über den Aufbau der Arbeit, Quelle: eigene Darstellung

1.3. Abgrenzung

Die Arbeit befasst sich mit unterschiedlichen Perspektiven zum automatisierten Fahren im Spannungsfeld Technologie, Mobilität und Siedlungsentwicklung. Ein besonderer Fokus wird dabei auf die Rolle und die Bedeutung des Straßenraums gelegt. Andere relevante Aspekte, die im Rahmen dieses Spannungsfeldes exogene Größen darstellen und ebenso einen Einfluss haben, wie beispielsweise gesellschaftliche oder auch verkehrspolitische Aspekte, werden mitgedacht, derartige Perspektiven stehen jedoch nicht im Vordergrund dieser Arbeit. Stattdessen ist es der Gegenstand des Straßenraums, dessen Rolle in diesem Spannungsfeld vordergründig untersucht und aufgezeigt wird. Auf Grundlage der Ergebnisse der unterschiedlichen Artikel werden letztlich Empfehlungen für die Verkehrs- und Stadtplanung hinsichtlich des zukünftigen Einsatzes automatisierter Fahrzeuge abgeleitet.

Im Rahmen der Arbeit werden darüber hinaus folgende Abgrenzungen vorgenommen:

Modal

Fokussiert der erste Artikel (Kapitel 4) auf die prinzipiellen verkehrlichen und räumlichen Wirkungen, die von automatisierten Fahrzeugen im Sinne vollautomatisierter Fahrzeuge (SAE-Level 5) ausgehen könnten, konzentriert sich der zweite Artikel (Kapitel 5) – auch aufgrund mangelnder Forschungsarbeiten hierzu und aufgrund der zunehmend skeptischen Betrachtung der technologischen Entwicklung automatisierter Fahrzeuge – auf das hochautomatisierte Fahren (SAE-Level 4) (siehe Kapitel 2). Hierbei wird davon ausgegangen, dass automatisierte Fahrzeuge aufgrund der Heterogenität der Straßenräume und deren Nutzungen nicht – wie in zahlreichen früheren und im ersten Artikel berücksichtigten Studien angenommen – gleichmäßig über die Siedlungsstruktur hinweg eingesetzt werden können. Hierdurch rücken Phänomene eines räumlich selektiven und differenzierten Einsatzes in den Mittelpunkt der Betrachtung. Dies umso mehr, als dass Straßen innerorts neben dem Verkehr auch die Bewohnbarkeit und die Funktionsfähigkeit von Städten sicherstellen müssen und auch im Fall des automatisierten Verkehrs die Optimierung der Straßen für Transportzwecke mit deren Nutzung als Lebens- und Aufenthaltsraum im Konflikt stehen wird (vgl. Mitteregger et al. 2020: VIII). Diese Umstände erfordern räumlich differenzierte Analysen, die in dieser Dissertation vorgenommen werden: Während im zweiten Artikel (Kapitel 5) speziell die technisch-infrastrukturelle Eignung von Straßenräumen betrachtet wird, wird im dritten Artikel (Kapitel 6) die Verträglichkeit automatisierter Fahrzeuge mit den Ansprüchen von NutzerInnen und Umfeldnutzungen in Straßenräumen untersucht und der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge gegenübergestellt. Im unmittelbaren Fokus der Betrachtung aller drei Artikel stehen dabei vor allem automatisierte Fahrzeuge im Personenverkehr.

Zeitlich

Die Darstellung der prinzipiellen verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge (Kapitel 4) betreffen die ferne Zukunft, d.h. einen Zeitpunkt, in welchem ein sehr großer Teil der derzeitigen (motorisierten) Verkehrsnachfrage mit automatisierten Fahrzeugen abgewickelt werden kann und eine sehr hohe Marktdurchdringung automatisierter Fahrzeuge besteht – ein Zeitraum, der laut Studien (z.B. Altenburg et al. 2018, ERTRAC 2019, Abegg et al. 2018) nicht vor 2050 erreicht wird. Im Rahmen der Analyse der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen (Kapitel 5) liegt der Fokus hingegen auf einer zeitlich

naheliegenden Phase des Übergangs, in der automatisierte Fahrzeuge nicht gleichmäßig über die Siedlungsstruktur eingesetzt werden können – fokussiert wird hier also auf die nahe Zukunft, d.h. die nächsten Jahre und Jahrzehnte.

Räumlich

Während der Überblick hinsichtlich prinzipieller verkehrlicher und räumlicher Wirkungen automatisierter Fahrzeuge (Kapitel 4) räumlich umfangreich und auf gesamtstädtischer Ebene, d.h. auf Grundlage mehrerer Studien in unterschiedlichen Städten und Ländern, erfolgt, werden die methodischen Analysen zur räumlich-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen (Kapitel 5) sowie zur Bewertung der straßenräumlichen Verträglichkeit (Kapitel 6) räumlich vertiefter auf Ebene des Straßennetzes, d.h. für Straßenabschnitte, und am Beispiel von Wien – als beispielhafte historisch gewachsene europäische Stadt – angewandt. Obwohl die jeweilige angewandte Untersuchungsmethodik auch auf andere Kontexte übertragbar ist, steht im Rahmen dieser Arbeit somit eine europäische Sichtweise im Vordergrund.

2. Stand der Forschung

2.1. Automatisiertes Fahren: Technologische Entwicklungen und aktueller Entwicklungsstand

Automatisiertes Fahren bezeichnet die (vollständige) Übernahme der Längs- (Geschwindigkeit halten, Gas geben und bremsen) und Querführung (lenken) eines Fahrzeugs durch ein System (vgl. VDA 2015: 14). Unter automatisierten Fahrzeugen versteht man also grundsätzlich Fahrzeuge, die einen großen Anteil der Fahrleistungen eigenständig übernehmen bis hin zu fahrerlos betrieben werden können. Zum Teil gibt es unterschiedliche bestehende Einteilungen in Automatisierungsstufen. International durchgesetzt hat sich in der wissenschaftlichen Debatte die Einteilung J3016 der Society of Automotive Engineers (SAE), wonach sechs unterschiedliche Levels unterschieden werden können (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über die Automatisierungslevel zum automatisierten Fahren (eigene Darstellung nach SAE International 2018: 19)

Level	Name	Beschreibung	Quer- und Längsführung	Umgebungsbeobachtung	Rückfall-ebene	Operational Design Domain
Fahrer n führt alle Fahraufgaben aus						
0	No Driving Automation (keine Automation)	Die/Der Fahrer n fährt eigenständig auch wenn unterstützende Systeme vorhanden sind	Fahrer n	Fahrer n	keine	n/a
1	Driver Assistance (Assistenzsysteme)	Fahrerassistenzsysteme helfen bei der Fahrzeugbedienung bei Längs-oder Querführung (nicht gleichzeitig)	Fahrer n	Fahrer n	Fahrer n	Limitiert
2	Partial Driving Automation (Teilautomatisierung)	Ein oder mehrere Fahrerassistenzsysteme helfen bei der Fahrzeugbedienung bei Längs-und gleichzeitiger Querführung Fahrer n muss System dauerhaft überwachen	System	Fahrer n	Fahrer n	Limitiert
System führt alle Fahraufgaben aus						
3	Conditional Driving Automation (Bedingte Automatisierung)	Autonomes Fahren mit der Erwartung dass die/der Fahrer n auf Anforderung zum Eingreifen reagieren muss	System	System	Rückfallbereite/r Nutzer n	Limitiert
4	High Driving Automation (Hochautomatisierung)	Automatisierte Führung des Fahrzeugs mit der Erwartung dass die/der Fahrer n auf Anforderung zum Eingreifen reagiert Ohne menschliche Reaktion steuert das Fahrzeug weiterhin autonom Fahrer n muss System nicht dauerhaft überwachen	System	System	System	Limitiert
5	Full Driving Automation (Vollautomatisierung)	Vollständig autonomes Fahren bei dem die dynamische Fahraufgabe unter jeder Fahrbahn und Umgebungsbedingung wie von einer/einem menschlichen Fahrer n durchgeführt wird	System	System	System	unlimitiert

Während in den Levels 0 (keine Automation), 1 (Assistenzsysteme) und 2 (Teilautomatisierung) die bzw. der FahrerIn alle Fahraufgaben ausführt, werden ab dem Level 3 (bedingte Automatisierung) alle Fahraufgaben durch das System ausgeführt. Hierbei sind bedingt automatisierte Fahrzeuge (Level 3) jene Systeme, die die bzw. der FahrerIn nicht mehr dauerhaft überwachen muss, da die Längs- und Querführung in spezifischen Anwendungsfällen bzw. dafür ausgelegten Bereichen automatisiert ausgeführt wird, die bzw. der FahrerIn jedoch potenziell in der Lage sein muss, zu übernehmen, wenn das System die Übernahme fordert (vgl. VDA 2015: 15, SAE International 2018: 19).

Ab dem Level 4 kann die bzw. der FahrerIn die komplette Fahraufgabe an das System übergeben ohne potenziell in der Lage sein zu müssen, zu übernehmen (keine Übernahmeaufforderung), wobei dies im Level 4 nur in spezifischen Anwendungsfällen bzw. in dafür ausgelegten Bereichen möglich ist, während im Level 5, die Fahraufgabe vom System vollumfänglich in allen Bereichen und Umfeldbedingungen übernommen wird.

Somit werden als hochautomatisierte Fahrzeuge (Level 4) jene Fahrzeuge bezeichnet, deren Systeme alle Situationen automatisch bewältigen können, doch lediglich in einem dafür ausgelegten Bereich, d.h. in einer spezifischen sogenannten Operational Design Domain (ODD)² fahrerlos betrieben werden bzw. die Fahraufgabe übernehmen. Als vollautomatisierte Fahrzeuge (Level 5) werden jene Fahrzeuge bezeichnet, deren Systeme die Fahraufgabe vollumfänglich für alle Straßentypen, Geschwindigkeitsbereiche und Umfeldbedingungen übernehmen (unabhängig von der ODD bzw. für alle ODDs) und die somit immer und überall von Start bis Ziel ohne FahrerIn betrieben werden (vgl. SAE International 2018: 19).

Erst ab dem Automatisierungslevel 4 muss die bzw. der FahrerIn (in der entsprechenden ODD) also nicht mehr in der Lage sein das automatisierte Fahrzeug übernehmen zu können und wird von ihrer bzw. seiner Fahreraufgabe entledigt und verkehrt sozusagen als PassagierIn im Fahrzeug.

Die aktuelle öffentliche Wahrnehmung zum automatisierten Fahren (und auch die Abschätzung der Wirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Mobilität und Siedlungsentwicklung) ist noch weitgehend davon bestimmt, dass man mit einem automatisierten Fahrzeug überall und ohne Einschränkungen unterwegs sein kann (Level 5). Derzeit werden jedoch in Serienfahrzeugen erst teilautomatisierte Funktionen (Level 2), wie beispielsweise Stau-Assistenten, verbaut. Und auch im fachlichen Diskurs wird ein „revolutionäres Szenario“, in dem es einem Marktakteur gelingt abrupt ein Fahrsystem zu entwickeln, das überall allen Fahraufgaben gewachsen ist, die auch menschliche FahrerInnen bewältigen (vgl. Beiker 2015), heute weitestgehend ausgeschlossen. Stattdessen wird eine ausgedehnte Phase des Übergangs erwartet, während der automatisierte Fahrzeuge nur in technologisch geeigneten oder in schrittweise freigegebenen, d.h. begrenzten Teilen des Straßennetzes eingesetzt werden können. Der Fokus hinsichtlich automatisierter Fahrzeuge liegt insbesondere in der nahen Zukunft also vielmehr auf Level-4 Fahrzeugen, d.h. automatisierten Fahrsystemen, die nur in bestimmten Bereichen und unter bestimmten Bedingungen, sogenannten Operational Design Domains (ODDs), betrieben werden können (vgl. Axhausen et al. 2020: 10, Mitteregger et al. 2020, Perret et al. 2017).

² Eine Operational Design Domain (ODD) beschreibt unter welchen Bedingungen ein automatisiertes Fahrsystem betrieben werden kann. Unter anderem betrifft dies Komponenten wie Straßentypen (z.B. Design- und Layoutparameter), Geschwindigkeitsbereiche, Wetter, Tag/Nacht (vgl. AustriaTech 2019: 12, Bmvit 2018: 51).

Diese Operational Design Domains können je nach automatisiertem Fahrzeug bzw. automatisiertem Fahrsystem unterschiedlich ausgeprägt sein. Die ODD beschreibt jedoch immer jene Umfeldbedingungen, innerhalb derer ein automatisiertes Fahrsystem funktioniert. Parameter dieses Umfelds können unter anderem sein: geographische Lage, Straßentyp, Umwelt, Verkehr, Geschwindigkeit, Zeit etc. (vgl. SAE International 2018: 12; NHTSA 2017: 6; BSI 2020: 5; Thorn et al. 2018: 31) (Abbildung 3).



Abbildung 3: Mögliche Charakteristika der Operational Design Domain (eigene Darstellung nach Mitteregger et al. 2020)

Klarerweise entwickelt sich bzw. kann sich die Operational Design Domain mit der technologischen Entwicklung weiterentwickeln und beispielsweise auch größere oder weitere Gebiete, Straßentypen oder andere Rahmenbedingungen umfassen. Letztlich werden jedoch bestimmte Umfeldbedingungen, d.h. die Operational Design Domains, die Einsatzgebiete automatisierter Fahrzeuge noch eine geraume Zeit bestimmen.

Exkurs: Waymo One, Phoenix, Arizona

Auch bei den derzeitigen Tests bzw. beim derzeitigen Betrieb von fahrerlosen Fahrzeugen, z.B. beim Betrieb von Waymo One in Phoenix, Arizona, handelt es sich um Level 4-Fahrzeuge, die nur in einem bestimmten Gebiet (Abbildung 4) und unter bestimmten Bedingungen, z.B. Einschränkungen bei Regen (Abbildung 5) unterwegs sind (Abbildung 5) (vgl. Waymo 2020: 16).

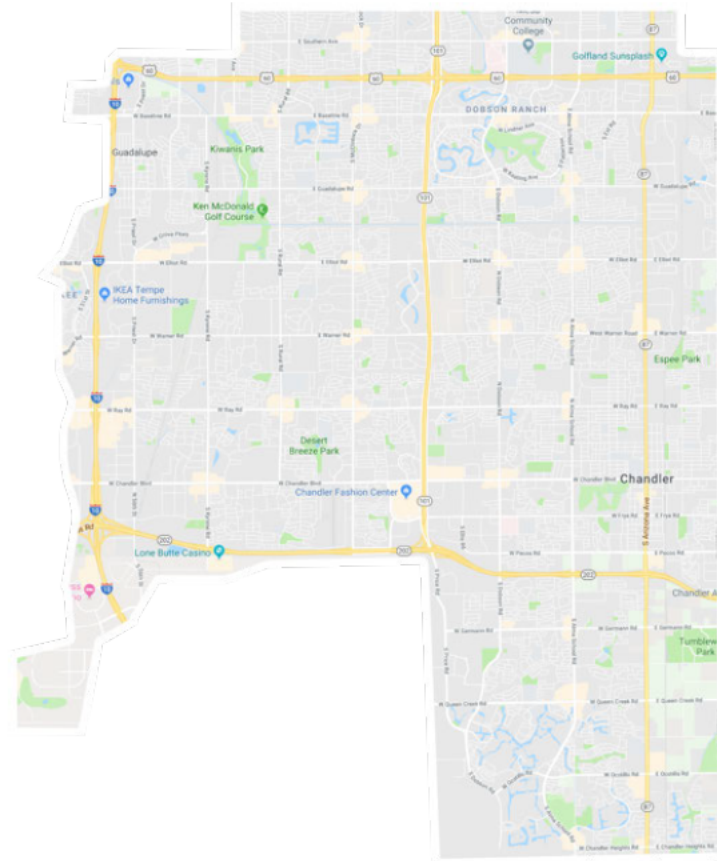


Abbildung 4: Räumliches Betriebsgebiet von Waymo One in Chandler, Arizona, Quelle: <https://cdn.arstechnica.net/wp-content/uploads/2018/12/waymo-coverage-map.png>

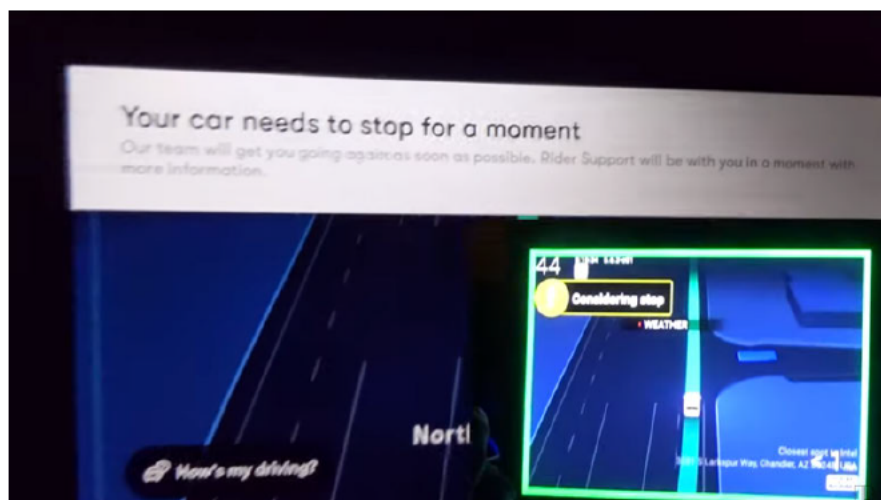


Abbildung 5: Einschränkungen durch Wetterbedingungen bzw. Regen (rechts), Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=00yjYH6v0b8>, min. 7:33

2.2. Automatisiertes Fahren im Kontext von Mobilität, Verkehrsinfrastruktur- und Siedlungsentwicklung

2.2.1. Mobilitätsinnovationen, Verkehrsinfrastruktur- und Siedlungsentwicklung

Wie eingangs beschrieben haben neue technologische Mobilitätsinnovationen – und dazu gehören auch automatisierte Fahrzeuge – schon immer einen Einfluss, nicht nur auf die Mobilität an sich, sondern auch auf das Erscheinungsbild von Städten, Siedlungsstrukturen und Straßenräumen gehabt.

Während Städte im Mittelalter noch fußläufig erreichbar waren, veränderte die Eisenbahn und später das Auto die Beschaffenheit von Städten und Siedlungsstrukturen in umfassender Form und auch Straßenräume haben sich im Zuge dieser unterschiedlichen technologischen Mobilitätsinnovationen gewandelt (vgl. Kagermeier 1997: 22 f). Dies lässt sich auch heute noch in europäischen Städten mit ihrer Vielfalt von historischen Stadtquartieren und neuen Stadtvierteln erkennen: „So spiegelt die Entwicklung der Siedlungsstruktur – das heißt der Ausdehnung, des inneren Gefüges und der Verteilung der Siedlungen im Raum – die geschichtliche Entwicklung der Verkehrssysteme: der zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel, der anzutreffenden Verkehrswege und vor allem der Verkehrsgeschwindigkeiten“ (Schmitz 2001: 27). Solche technologischen Mobilitätsinnovationen haben letztlich die Mobilität von Personen, die Gestalt von Siedlungen und Straßenräumen und auch das gesellschaftliche Leben stark geprägt.

Im Zusammenhang mit Mobilitätsinnovationen sind aber nicht nur die Fahrzeuge bzw. Fortbewegungsmittel an sich von Bedeutung, sondern auch die damit verbundene Verkehrsinfrastruktur, wie Schienennetze oder Straßennetze (vgl. McShane 1994). Die Verkehrsinfrastrukturen stellen dabei im Vergleich zu den Fahrzeugen den unbeweglichen Teil dar, der für die verkehrlichen und räumlichen Wirkungen neuer Verkehrsmittel (Erreichbarkeitsveränderung, Wandel von Raumnutzung und damit verbundene ökonomische, soziale Effekte) wesentlich ist (vgl. Mitteregger et al. 2020: 67).

Die Wechselwirkung zwischen technologischen Mobilitätsinnovationen und räumlichen Wirkungen lässt sich mit dem sogenannten land-use feedback cycle (vgl. Wegener & Fürst 1999: 5) beschreiben (Abbildung 6) – siehe hierzu auch Mitteregger et al. (2020).

Raumnutzung und Verkehr stehen in einer Interdependenz zueinander und bilden über die zentrale Größe Erreichbarkeit ein Wirkungsgefüge (Wegener & Fürst 1999: 5f, Bertolini 2012: 19). Die Wirkungen innerhalb des Systems weisen unterschiedliche Geschwindigkeiten auf: Kommt es zu einer Veränderung im Verkehrssystem, führt dies unmittelbar zu einer Veränderung der Erreichbarkeitsverhältnisse und gleichzeitig zu entsprechenden Veränderungen in der Bewertung von Distanzen (Kagermeier 1997: 22). Dadurch können bei veränderten Mobilitätskosten neue bzw. andere funktionale Beziehungen zwischen bereits bestehenden Standorten aufgenommen werden. Ebenso führt eine Veränderung in der Raumnutzung bzw. Siedlungsstruktur zu einer Veränderung der Erreichbarkeitsverhältnisse und zu einer relativ schnellen Adaptierung der Mobilitätsaktivitäten (innerhalb von Jahren oder sogar Tagen) (vgl. Bertolini 2012: 2). Die jeweiligen Veränderungen in den Erreichbarkeitsverhältnissen wirken sich jedoch nur mittel- bis langfristig (in der Größenordnung von Jahrzehnten) auf die Siedlungsstruktur oder das Verkehrsangebot aus (Bertolini 2017: 27). So hat der veränderte Aufwand, Distanzen zu überwinden, erst mittel- bis

langfristig Effekte auf die Standortentscheidungen von Bauinvestoren (und deren Bautätigkeiten) sowie auf Personen, Haushalte und Unternehmen und damit auf die Siedlungsstruktur (vgl. Kagermeier 1997: 22).

Dieses Wirkungsgefüge ist in gesellschaftliche, politische und ökonomische Prozesse eingebettet; die Entwicklungen im Wirkungsgefüge werden somit auch durch andere, exogene Faktoren mitbestimmt: So hängen Entwicklungen im Bereich der Raum- und Flächennutzung nicht nur von den Erreichbarkeitsbedingungen, sondern zum Beispiel auch von der Flächenverfügbarkeit ab. Für die Entstehung von Aktivitätsmustern spielen ebenso individuelle Charakteristika von Haushalten und Unternehmen und Charakteristika des erweiterten sozioökonomischen Kontextes (sozio-demographische, ökonomische oder kulturelle Faktoren und Trends) eine Rolle und nicht zuletzt wird auch das Verkehrsangebot nicht nur durch die Verkehrsnachfrage bestimmt, sondern ebenso durch Infrastrukturinvestitionen, Verkehrspolitik und technologische Innovationen – wie zum Beispiel eben dem automatisierten Fahren (vgl. Bertolini 2017: 28).

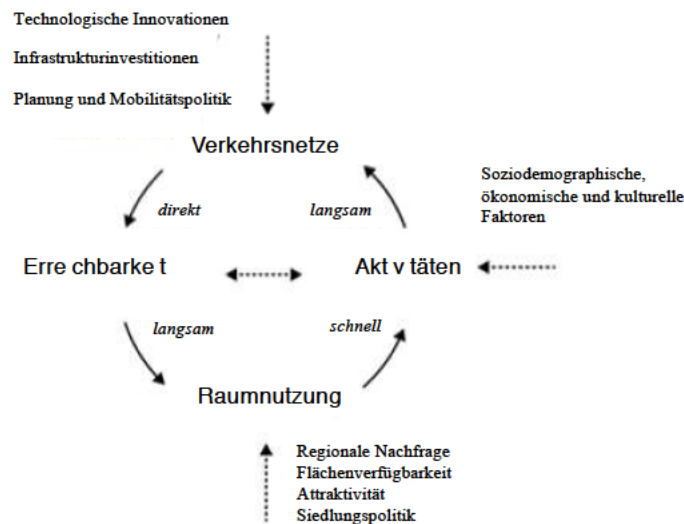


Abbildung 6: Wirkungsgefüge von Raumnutzung und Verkehr, Quelle: eigene Darstellung, nach Bertolini 2017 und Mitteregger et al. 2020

2.2.2. Automatisiertes Fahren als neue technologische Mobilitätsinnovation

Mit der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge reiht sich nun eine neue technologische Mobilitätsinnovation in die Reihe der oben beschriebenen technologischen Innovationen im Bereich der Mobilität ein. Automatisierte Fahrzeuge stellen ein neues Verkehrsangebot dar, welches die Mobilität durch verschiedene Aspekte verändert. So werden durch automatisierte Fahrzeuge vor allem folgende Eigenschaften des Verkehrsangebots bzw. der Verkehrsinfrastruktur verändert (vgl. Milakis et al. 2017, Mitteregger et al. 2020: 79) (Abbildung 7):

- Fahrzeit
- Kosten
- Sicherheit
- Straßenkapazität
- Anforderungen für die Fahrzeugnutzung

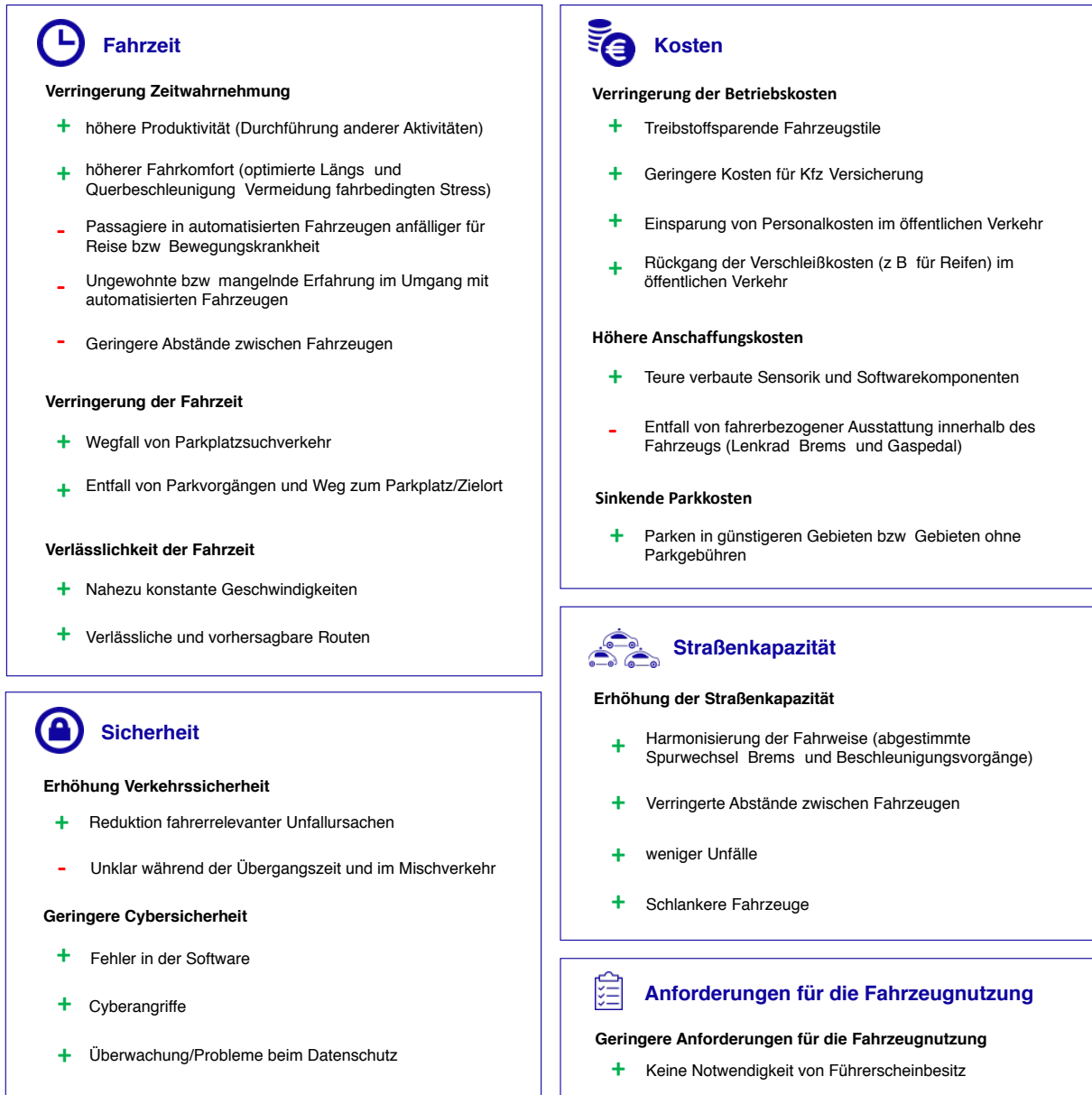


Abbildung 7: Übersicht über Veränderungen spezifischer Eigenschaften des Verkehrsangebots durch automatisierte Fahrzeuge, Quelle: eigene Darstellung aufbauend auf Mitteregger et al. 2020: 79

Automatisierte Fahrzeuge bergen als Mobilitätsinnovation hierdurch ein hohes Potenzial zur Veränderung des Verkehrssystems und ermöglichen ein anderes Verkehrsangebot, das Veränderungen in der Verkehrsnachfrage mit sich bringen wird (vgl. Alessandrini et al. 2015: 148, Friedrich & Hartl 2016: 7). Langfristig sind jedoch auch Auswirkungen auf die Stadt- und Siedlungsentwicklung (z.B. Standortwahl von Personen und Betrieben) wahrscheinlich (vgl. Europäische Kommission 2016: 2; Mitteregger et al. 2020: 72). Natürlich wird diese Entwicklung – wie in Abbildung 6 – dargestellt aber auch durch andere Faktoren (z.B. sozio-demographische Aspekte etc.) beeinflusst und auch eine potentielle Umwandlung von Parkplätzen durch automatisierte Fahrzeuge beeinflusst wiederum die Verfügbarkeit von Bauland und damit die Standortwahl und die Siedlungsentwicklung (vgl. Moreno 2017: 6).

2.2.3. Die Relevanz des Straßenraums

Zieht man die Beschreibung der automatisierten Fahrsysteme und den Fokus auf die Operational Design Domain in Betracht, zeigt sich, dass der Straßenraum für den Einsatz und die Funktionsweise automatisierter Fahrzeuge einen wesentlichen Einflussfaktor darstellt, der jedoch in der bisherigen Betrachtung mit automatisierten Fahrzeugen von Seiten der Stadt- und Verkehrsplanung noch weitgehend unberücksichtigt bleibt. Die Ebene des Straßenraums ist dabei aus zweierlei Hinsicht relevant (Abbildung 8) – siehe hierzu auch Soteropoulos (2021):

1. Einerseits stellen Straßenräume unterschiedliche Komplexitätsanforderungen für automatisierte Fahrsysteme dar. Straßenräume können sich dabei hinsichtlich ihrer Funktion (z.B. Verbindungs- oder Erschließungsfunktion), der Verkehrsmengen, Gebietscharakteristik (z.B. alter Dorfkern oder neues Gewerbegebiet), Umfeldnutzungen sowie straßenräumlicher Situationen (z. B. Begrenzung, Breite und Verlauf) unterscheiden (vgl. Marshall 2005: 54, FGSV 2007: 5). Für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge bedeuten diese unterschiedlichen Straßenraumkontexte unterschiedliche Anforderungen: Nimmt die Komplexität der Einsatzumgebung, d.h. der Operational Design Domain beispielsweise durch eine Vielzahl von zu erfassenden FußgängerInnen, RadfahrerInnen oder durch komplexe Knotenpunktformen zu, so steigen die Ansprüche an das automatisierte Fahrsystem (vgl. Czarnecki 2018, SAE International 2018: 14, Rentschler et al. 2020: 329).

Für die Verkehrs-, Infrastruktur- und Stadtplanung kann die Analyse von Straßenräumen hinsichtlich der Eignung für automatisierte Fahrzeuge aus technisch-infrastruktureller Sicht daher Informationen darüber geben, wo automatisierte Fahrzeuge aufgrund der umgebenden Straßenraum- und Umfeldbedingungen vermutlich eher bzw. mit weniger Infrastrukturadaptierungen verkehren können und wo nicht. Damit kann auch erkannt werden, bei welchen Straßenräumen der Einsatz automatisierter Fahrzeuge mit größerem oder weniger großem Aufwand möglich ist. Dies ist jedoch potenziell auch für die mit automatisierten Fahrzeugen verbundenen Wirkungen relevant: Wenn automatisierte Fahrzeuge nur innerhalb bestimmter Umfeldbedingungen, z.B. zunächst in weniger komplexen Straßenräumen, zum Einsatz kommen, hat dies eine zeitliche Staffelung zur Folge und auch die mit automatisierten Fahrzeugen verbundenen Wirkungen in der Stadt finden somit zunächst nur an verstreuten Stellen statt (vgl. Ritz 2018: 74). Damit verbunden ist auch ein mögliches Verschieben der Standortqualitäten, wenn beispielsweise nur einige Standorte an ein überregionales „automatisiertes“ Verkehrsnetz angeschlossen sind und andere nicht (vgl. Mitteregger et al. 2020: 64, Madadi et al. 2021: 9).

2. Andererseits besteht an Straßenräume grundsätzlich eine Fülle von Nutzungsansprüchen, Anforderungen und Bedürfnissen von Menschen, sich darin aufzuhalten oder zu bewegen. Neben der Verkehrsfunktion von Straßen ergeben sich die Art und das Ausmaß weiterer Anforderungen an den Straßenraum aus dem Straßenumfeld, d.h. aus der Art der Nutzung der Randbebauung, deren Orientierung zum Straßenraum und anderen Faktoren (vgl. Bühlmann & Laube 2013: 9). Diese stehen zum Teil in Widerspruch zueinander und führen zu Nutzungskonflikten (vgl. Häfliger et al. 2015: 19): So wird gleichfalls die Nutzung und Nutzbarkeit von

Straßenräumen (bzw. öffentlichen Räumen) durch FußgängerInnen (und RadfahrerInnen), um sich dort fortzubewegen, aufzuhalten, zu verweilen oder zu spielen (vgl. Gehl Architects 2009: 43) von den Rahmenbedingungen der Straßenräume, wie beispielsweise der Konkurrenz mit anderen Nutzungen – und hierbei insbesondere mit dem fließenden (und ruhenden) motorisierten Verkehr – geprägt. Dieser nimmt nicht nur Flächen in Anspruch, sondern stellt auch ein Gefährdungspotential für alte wie junge Menschen dar und kann schwer überwindbare Barrieren in Straßenräumen schaffen und hat damit einen besonderen Einfluss auf den Straßenraum (vgl. Fugmann et al. 2017: 13). Konflikte zwischen den Ansprüchen des motorisierten Individualverkehrs und den übrigen Bedürfnissen (andere Verkehrsarten wie Zufußgehen und Radfahren) sind nur bis zu einer gewissen Intensität verträglich bzw. abhängig von der konkreten Situation zumutbar. Steigt die Verkehrsbelastung jedoch über diese Grenze, erreicht sie eine Dominanz, welche die übrigen Nutzungsansprüche in nicht mehr verträglichem Ausmaß beeinträchtigt (vgl. Bühlmann & Laube 2013: 10). Aus Sicht der Planung ist es deshalb ebenso notwendig, zu untersuchen, inwieweit der mögliche Einsatz automatisierter Fahrzeuge aufgrund der mit ihnen verbundenen Wirkungen wie einer Zunahme der Verkehrsleistung (siehe hierzu Kapitel 4) sowie einer Erhöhung der Trennwirkung durch eine dichtere Fahrzeugfolge mit den übrigen Nutzungsansprüchen an den Straßenraum verträglich ist.

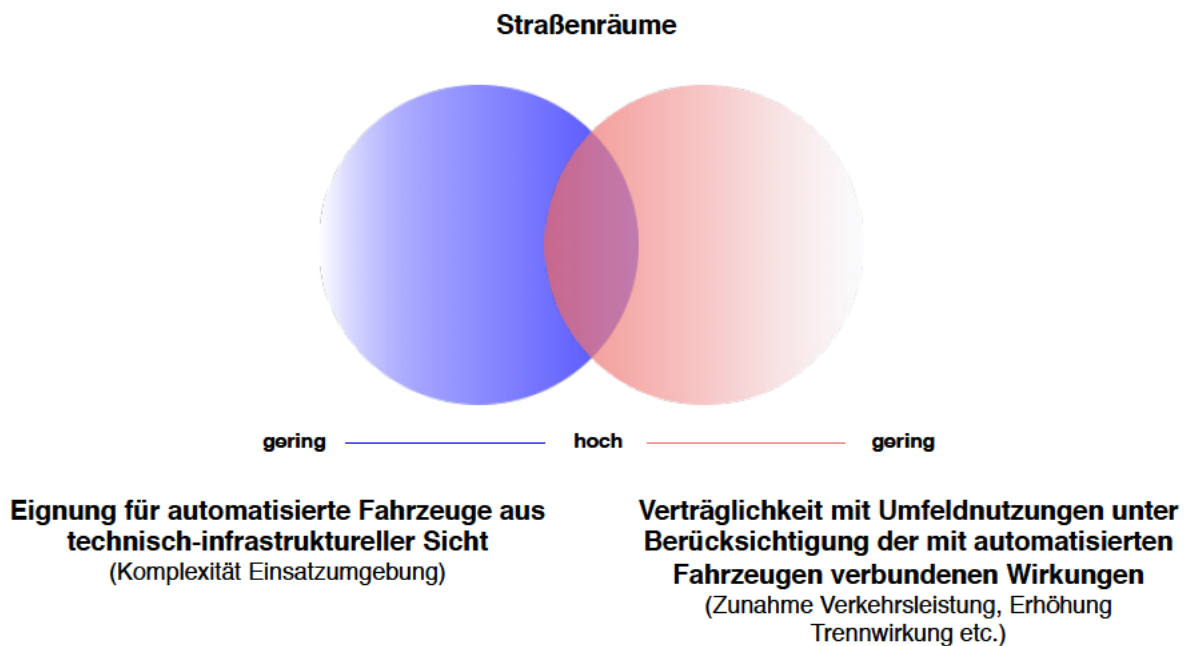


Abbildung 8: Überblick zur Relevanz der Straßenräume für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge, Quelle: eigene Darstellung aufbauend auf Soteropoulos 2021

Die Zusammenführung beider Bewertungen, also 1) der Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge aus technisch-infrastruktureller Sicht und 2) der Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen mit den Umfeldnutzungen in unterschiedlichen Straßenräumen, ist von wesentlicher Bedeutung, um abzuschätzen, wo aus verkehrs- und stadtplanerischer Sicht in naher Zukunft besonderer Handlungsbedarf besteht, sowie um entsprechende Strategien für einen bestmöglichen Einsatz automatisierter Fahrzeuge zu entwickeln (Abbildung 9).

		Straßenräumliche Verträglichkeit (mit Umfeldnutzungen)	
		gering	hoch
Eignung aus technisch- infrastruktureller Sicht	gering	Einsatz automatisierter Fahrzeuge nur mit großen Anpassungen möglich und mit Umfeldnutzungen nicht verträglich	Einsatz automatisierter Fahrzeuge nur mit großen Anpassungen möglich, aber mit Umfeldnutzungen verträglich
	hoch	Relativ rascher Einsatz automatisierter Fahrzeuge ohne große Anpassungen möglich, aber mit Umfeldnutzungen nicht verträglich	Relativ rascher Einsatz automatisierter Fahrzeuge ohne große Anpassungen möglich und mit Umfeldnutzungen verträglich

Abbildung 9: Zusammenhang zwischen der Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge aus technisch-infrastruktureller Sicht und straßenräumlicher Verträglichkeit, Quelle: eigene Darstellung aufbauend auf Soteropoulos 2021

2.2.4. Zusammenschau und Einbettung der unterschiedlichen Perspektiven und Artikel

Aufbauend auf den obigen Ausführungen zeigen die drei Artikel in den nächsten Kapiteln unterschiedliche Perspektiven im Kontext von automatisierten Fahrzeugen, Verkehr und Siedlungsentwicklung auf.

Der erste Artikel gibt erstmals eine umfassende Perspektive darauf, welche prinzipiellen verkehrlichen und räumlichen Wirkungen mit (voll-)automatisierten Fahrzeugen zu erwarten sind und wie diese Wirkungen sowie ihre Ausprägungen mit unterschiedlichen Einflussgrößen zusammenhängen. Gleichfalls wird in den beiden weiteren Artikeln – vor dem Hintergrund der zunehmend skeptischen Betrachtung der technologischen Entwicklung automatisierter Fahrzeuge und dem weitgehenden Fokus auf Level-4-Fahrzeuge in naher Zukunft – die Ebene des Straßenraums, der in Studien zu potentiellen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge bislang nur unzureichend berücksichtigt wurde, in den Fokus gestellt: Der zweite Artikel untersucht, welche Straßenräume aus technisch-infrastruktureller Sicht eher für automatisierte Fahrzeuge geeignet ist. Der dritte Artikel greift die verkehrlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge auf und untersucht die Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen in Straßenräumen und führt diese Untersuchung mit der Analyse zur technisch-infrastrukturellen Eignung zusammen (Abbildung 10).

Artikel 2: Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge

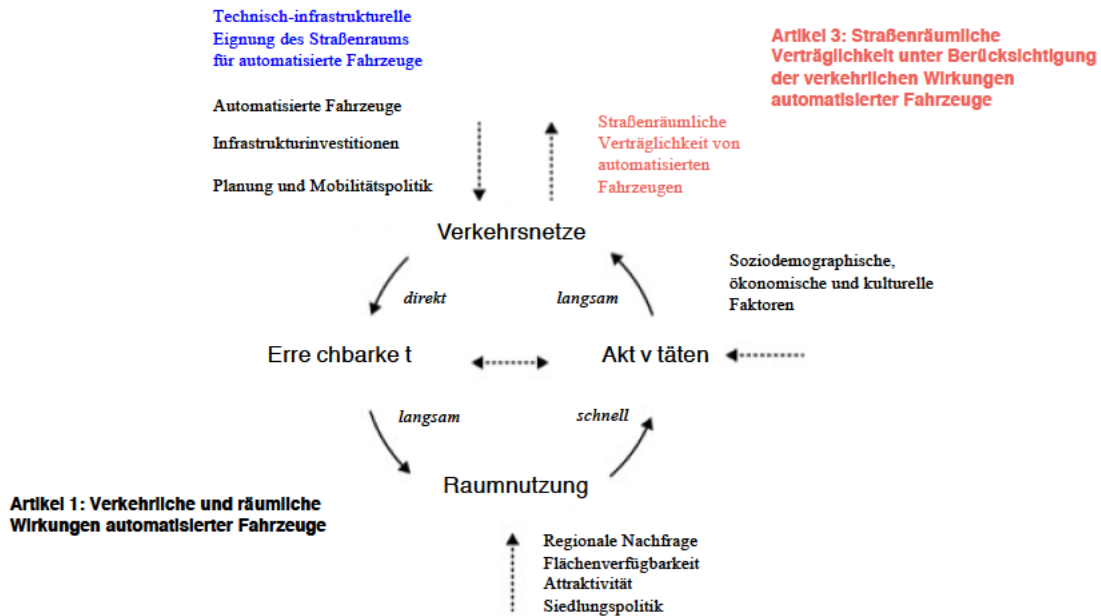


Abbildung 10: Überblick über die Artikel und deren Einordnung im Wirkungsgefüge von Raumnutzung und Verkehr, Quelle: eigene Darstellung aufbauend auf Bertolini 2017

Die Artikel liefern somit Grundlagen zu folgenden Fragestellungen:

- **Artikel 1:** Darstellung der verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge
 - Welche verkehrlichen und räumlichen Wirkungen sind durch (voll-)automatisierte Fahrzeuge zu erwarten?
 - Von welchen Einflussgrößen hängen diese Wirkungen ab?
 - Welche Aspekte bleiben in bisherigen Studien noch unberücksichtigt?
- **Artikel 2:** Untersuchung und Darstellung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge
 - Wie kann man die technisch-infrastrukturelle Eignung von Straßenräumen für das automatisierte Fahren bewerten?
 - Welche Straßenräume sind für automatisierte Fahrzeuge aus technisch-infrastruktureller Sicht eher geeignet und welche weniger? Wo können automatisierte Fahrzeuge vor dem Hintergrund deren unterschiedlicher technisch-infrastruktureller Eignung zeitlich eher bzw. später eingesetzt werden?
 - In welchen Straßenräumen und Gebieten benötigt es für die Forcierung des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge zusätzliche Maßnahmen (z.B. Vereinfachung der Einsatzumgebung durch Verringerung der Geschwindigkeit oder durch bauliche und digitale Infrastruktur)?
- **Artikel 3:** Untersuchung und Darstellung der Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen in Straßenräumen
 - Wie lässt sich die Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen in Straßenräumen unter Berücksichtigung der mit ihnen verbundenen Wirkungen bewerten?

- In welchen Straßenräumen sind mit automatisierten Fahrzeugen assoziierte Wirkungen wie eine Zunahme der Verkehrsleistung und eine Erhöhung der Trennwirkung durch eine dichtere Fahrzeugfolge eher mit den Ansprüchen der NutzerInnen und Umfeldnutzungen verträglich und in welchen weniger?
- In welchen Gebieten sollte der Einsatz automatisierter Fahrzeuge forciert werden? In welchen Gebieten sollte auf einen Einsatz automatisierter Fahrzeuge verzichtet werden oder der Einsatz an Maßnahmen zur Erhöhung der Verträglichkeit gekoppelt sein?

Die Erarbeitung dieser Grundlagen und auch die dafür erarbeiteten Bewertungsmethoden und -verfahren sind insbesondere für die Stadt-, Verkehrs- und Infrastrukturplanung unerlässlich, um das Phänomen und die Wirkungen automatisierter Fahrzeuge zu verstehen und letztendlich differenzierte Strategien für deren Einsatz zu formulieren.

3. Forschungsdesign und Methodik

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden in den drei Artikeln der Dissertation unterschiedliche Methoden verwendet. Im Sinne einer sogenannten Methodentriangulation, die in der Forschungspraxis bisweilen sehr häufig praktiziert wird und unter der im Allgemeinen eine Kombination von Methoden bzw. Methodologien sowie Theorien zur Untersuchung eines Phänomens verstanden wird (vgl. Lamnek 2010: 682, Fraedrich 2017: 22), wird in der Arbeit eine Kombination von Methoden bestehend aus einem systematischem Literaturreview (von Modellierungsstudien zur Wirkungsabschätzung) sowie quantitativen Methoden in der Form von GIS-basierten Analysen und Bewertungen genutzt. Diese Kombination von Methoden wurde angewendet, um die in den Forschungsfragen beinhalteten Perspektiven auf automatisierte Fahrzeuge und ihren Zusammenhang mit Mobilität und Verkehr und der Ebene des Straßenraums entsprechend umfassend zu untersuchen und abzubilden.

3.1. Systematisches Literaturreview von Modellierungsstudien zu verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge

Um zunächst den Forschungsstand der verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge zu explorieren, wurde ein umfassendes systematisches Literaturreview umgesetzt. Solche systematischen Literaturreviews sind eine eigenständige wissenschaftliche Methode und fassen in der Regel quantitative Studien zusammen, um eine Aussage bezüglich der Effektivität oder der Wirkungen einer Maßnahme, eines Produkts oder einer Technologie durch die Zusammenführung aller vorhandenen Evidenzen zu treffen, und letztlich auch zusätzlich eine Aussage über eventuell vorhandene Forschungslücken zu machen (vgl. Sturma et al. 2016: 209, Feak & Swales 2009: 3). In solchen Literaturreviews werden also zunächst gezielt und systematisch vorhandene Studien gesammelt und synthetisiert, um damit die Ergebnisse der Studien auf eine breite Basis zu stellen bzw. bestimmte Einflussgrößen und offene Fragen sowie weiteren Forschungsbedarf herauszuarbeiten (vgl. van Wee & Banister 2015: 278, Klatt 2019).

Da automatisierte Fahrzeuge noch nicht in umfassender Form im Einsatz und daher empirische Daten kaum verfügbar sind, konzentriert sich die wissenschaftliche Betrachtung der verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge hauptsächlich auf Modellierungen und Simulationen (vgl. Milakis et al. 2017, Zhang 2017). So wurden in den letzten Jahren mehrheitlich zwar vereinzelt Studien hinsichtlich der Modellierung der verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge vorgenommen. Was jedoch fehlt und mittels des systematischen Literaturreviews geleistet wird, ist die systematische Zusammenfassung bestehender Modellierungsstudien zu den verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge und deren Ergebnisse sowie die Aufbereitung von bestehenden Lücken für weitere Forschungsfragen.

In der Form eines systematischen Literaturreviews werden die bisher genutzten Methoden (diese reichen von mikroskopischen Modellen bzw. agenten-basierten-Modellen bis hin zu makroskopischen Modellen), die jeweiligen Szenarien und Annahmen (z.B. zu den in Kapitel 2.2.2 veränderten Charakteristika durch automatisierte Fahrzeuge) und die Ergebnisse (und die jeweiligen Ergebnisgrößen, wie z.B. gefahrene Fahrzeugkilometer etc.) der jeweiligen

Studien dezidiert und synthetisiert dargestellt. Hierdurch werden die verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge, jedoch auch die jeweiligen Einflussfaktoren umfassend beschrieben. Darüber hinaus werden durch das systematische Literaturreview bestehende Forschungslücken abgeleitet und aufgezeigt. Diese Forschungslücken, insbesondere die Rolle des Straßenraums als bislang weitgehend unberücksichtigter Aspekt im aktuellen Forschungsstand, werden in den beiden anderen Artikeln der Dissertation verstärkt thematisiert.

3.2. GIS-basierte Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge

Ausgehend von der mangelnden Berücksichtigung der Funktionsweise der Technologie automatisierter Fahrzeuge im Zusammenhang mit unterschiedlichen (infrastrukturellen) Umweltbedingungen in Straßenräumen in bisherigen Studien zu den Wirkungen automatisierter Fahrzeuge auf Verkehr und Raum, wurde eine GIS-gestützte Bewertung der Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge vorgenommen.

Auf der Grundlage der Funktionsweise automatisierter Fahrzeuge sowie empirischen Ergebnissen zu Herausforderungen bzw. störenden Faktoren bei der Erprobung bzw. bei Tests von automatisierten Fahrzeugen, z.B. Disengagement Reports aus Kalifornien, USA (vgl. Favarò et al. 2018), wurden zunächst Kriterien identifiziert, die auf die Funktionsweise automatisierter Fahrzeuge (z.B. Sensoren zum Erkennen der Umgebung oder Algorithmen zum Verständnis der wahrgenommenen Informationen und Wahl einer entsprechenden Fahrentscheidung) wirken bzw. deren Ausführung erschweren.

Angelehnt an bereits umgesetzte Studien im Themenkomplex Walkability (z.B. Kelly et al. 2011, Moura et al. 2017, Su et al. 2017) und Bikeability (z.B. Winters et al. 2013, Nielsen & Skov-Petersen 2018), die basierend auf der Sichtung empirischer Fachliteratur zunächst mögliche Kriterien identifizieren, die zur Abbildung der Attraktivität für das Z Fußgehen oder Radfahren dienen, wurden Indikatoren abgeleitet bzw. operationalisiert, die für die Funktionsweise automatisierter Fahrzeuge relevant sind (vgl. Jonietz & Timpf 2012: 4; Buck & Tkaczick 2014: 165). Die Ableitung, Operationalisierung und Analyse fanden dabei mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) statt. Solche Systeme werden grundsätzlich zur Erfassung, Bearbeitung, Abfrage und Verwaltung raumbezogener Informationen sowie für deren Analyse und Visualisierung eingesetzt und eignen sich daher besonders für solche Analysen (vgl. Borchert 2006: 127). Die Indikatoren wurden dabei am Beispiel des gesamten Straßennetzes der Stadt Wien, das entsprechend in einzelne maximal 100m lange Abschnitte unterteilt wurde, berechnet und auf Grundlage bestehender Literatur hinsichtlich ihrer Relevanz für die Funktionsweise automatisierter Fahrzeuge gewichtet. Durch diese Gewichtung und Verknüpfung der einzelnen Indikatoren wurde ein zusammenhängender Index, der Automated Drivability Index (ADX), gebildet, der für die einzelnen Straßenabschnitte im gesamten Wiener Straßennetz, die technisch-infrastrukturelle Eignung für den Einsatz automatisierter Fahrsysteme aufzeigt.

3.3. GIS-basierte Bewertung der straßenräumlichen Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen mittels des Kompensatorischen Ansatzes

Da für die Bewertung des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge nicht nur die technisch-infrastrukturelle Eignung von Straßenräumen relevant ist, sondern auch die Frage, inwieweit automatisierte Fahrzeuge bzw. die mit ihnen verbundenen verkehrlichen Wirkungen in Straßenräumen verträglich sind, wurde ebenso eine GIS-gestützte Bewertung der straßenräumlichen Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen durchgeführt.

Zur Bewertung der straßenräumlichen Verträglichkeit finden sich in der Literatur zahlreiche Verfahren wie beispielsweise das M.A.R.S.-Modell der autonomen und relativen Standards (vgl. Baier 1992), der Kompensatorische Ansatz (Mörner et al. 1984) oder das LADIR-Verfahren (Müller et al. 1994), die ihren Ursprung in den 1980er und 1990er Jahren haben, jedoch zum Teil in adaptierter Form auch in den letzten Jahren zum Beispiel bei Baier et al. (2011), Bühlmann und Laube (2013) oder Frehn et al. (2013) zur Anwendung kamen. Neben vielen qualitativen Ansätzen (z.B. Baier 2011, Müller et al. 1994 oder Frehn et al. 2013), die darauf basieren, einzelne Straßenabschnitte qualitativ und im Sinne von Vor-Ort-Begehungen zu bewerten, ermöglicht der sogenannte Kompensatorische Ansatz von von Mörner et al. (1984) bzw. Bühlmann und Laube (2013) eine umfangreichere quantitative Bewertung. Hierdurch lassen sich eine Vielzahl von Straßenabschnitten bewerten.

Als Grundlage für die Bewertung der straßenräumlichen Verträglichkeit automatisierter Fahrzeuge wurde daher der Kompensatorische Ansatz von von Mörner et al. (1984) und Bühlmann & Laube (2013) verwendet und unter Berücksichtigung der Wirkungen automatisierter Fahrzeuge entsprechend adaptiert.

Beim Kompensatorischen Ansatz wird für einzelne Straßenabschnitte – ausgehend von der Randbebauung bzw. der angrenzenden Nutzung sowie der Funktion und Bedeutung der Ortschaft – eine maximale Verkehrsbelastung in der Dimension „Anzahl der Kraftfahrzeuge pro Spitzenstunde“ (Kfz/Sp-h) festgelegt (vgl. von Mörner et al. 1984: 20, Bühlmann und Laube 2013: 12). In Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren wird diese maximale Verkehrsbelastung korrigiert und auf dieser Basis dann die Beurteilung der Verträglichkeit des vorhandenen Verkehrsaufkommens mit dem Straßenumfeld (gemessene Verkehrsbelastung im Vergleich zu maximal verträglicher Verkehrsbelastung) vorgenommen (vgl. Bühlmann und Laube 2013: 12, Häfliger et al. 2015: 31). Unter Berücksichtigung der mit dem automatisierten Fahren verbundenen und vorher beschriebenen Wirkungen hinsichtlich einer Zunahme der Trennwirkung durch eine mögliche dichtere Fahrzeugfolge wurde im Rahmen des angewendeten Kompensatorischen Ansatzes ebenso der Aspekt der Trennwirkung sowie der Querbeziehungen zwischen beiden Seiten von Straßenräumen explizit miteinbezogen bzw. der Ansatz um diese Aspekte erweitert.

Die Umsetzung des Bewertungsverfahrens erfolgte GIS-basiert, d.h. die einzelnen Kriterien wurden jeweils mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems abgeleitet, berechnet und analysiert und anschließend gewichtet und zusammengefügt.

Die Grundlage für die Veränderung der Kraftfahrzeuge in der Spitzenstunde in den einzelnen Straßenabschnitten bildeten durchgeführte MATSim Simulationen (vgl. Horni et al. 2016) von drei verschiedenen Szenarien mit automatisierten Fahrzeugen im gesamten Straßennetz Wiens, die im Rahmen des Forschungsprojekts Auto.Waves von Trafility simuliert wurden (vgl. Trafility 2020).

4. Verkehrliche und räumliche Wirkungen automatisierter Fahrzeuge

Zu Beginn der Dissertation bestanden zwar bereits zahlreiche Modellierungsstudien zu den verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge, eine zusammenfassende Darstellung und Systematisierung für ein umfassendes Bild hat jedoch noch gänzlich gefehlt. Im nachfolgenden Artikel „**Impacts of Automated Vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies**“, der 2019 in Transport Reviews (Impact Factor: 6.704 – 2019) veröffentlicht wurde, werden daher erstmals die zu den verkehrlichen und räumlichen Wirkungen von automatisierten Fahrzeugen bestehenden Modellierungsstudien systematisch aufgezeigt und deren Methoden, Annahmen und Szenarien sowie Ergebnisse betrachtet.

Insgesamt wurden anhand einer systematischen Suche in wissenschaftlichen Datenbanken (z.B. Scopus, Scencedirect) sowie grauer Literatur 37 Modellierungsstudien, die im Zeitraum 2013 bis 2018 veröffentlicht wurden, berücksichtigt und detailliert nach Methoden, Annahmen und Ergebnissen aufbereitet.

Das systematische Literaturreview konnte aufzeigen, dass automatisierte Fahrzeuge je nach Annahmen zu unterschiedlichen verkehrlichen und räumlichen Wirkungen führen. Während bei einer Annahme von Zunahmen bei der Straßenkapazität und privaten Fahrzeugen sowie bei geteilten Fahrzeugen (Car-Sharing) durch Leerfahrten die Anzahl an gefahrenen Fahrzeugkilometern zunimmt, kann besonders bei Ride-Sharing und bei der Nutzung automatisierter Fahrzeuge im Öffentlichen Verkehr die Zahl der gefahrenen Fahrzeugkilometer, aber auch die Anzahl der Fahrzeuge, die zur Bewältigung der Verkehrsnachfrage benötigt wird, reduziert werden und auch der Anteil des Öffentlichen Verkehrs am Modal-Split erhöht werden. Ähnliches zeigt sich auch bei den räumlichen Wirkungen, wo private automatisierte Fahrzeuge eher zu Suburbanisierungseffekten führen, wohingegen geteilte automatisierte Fahrzeuge und der Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Öffentlichen Verkehr eher zu Urbanisierungstendenzen, d.h. zur Konzentration von BewohnerInnen im Stadtzentrum, führen.

4.1. Impacts of automated vehicles on travel behavior and land use: an international review of modelling studies

Aggelos Soteropoulos^{a*}, Martin Berger^a, and Francesco Ciari^b

^a Institute for Transportation System Planning, Technical University of Vienna, Vienna, Austria

^b Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Graz, Austria

* Corresponding author: Aggelos Soteropoulos, Institute for Transportation System Planning, Technical University of Vienna, Augasse 2-6, 1090 Vienna, Austria. E-Mail: aggelos.soteropoulos@tuwien.ac.at

Veröffentlicht 2019 in Transport Reviews, Vol. 39, S. 29-49.

Abstract

Automated vehicles (AVs) could completely change mobility in the coming years and decades. As AVs are still under development and gathering empirical data for further analysis is not yet possible, existing studies mainly applied models and simulations to assess their impact. This paper provides a comprehensive review of modelling studies investigating the impacts of AVs on travel behaviour and land use. It shows that AVs are mostly found to increase vehicle miles travelled and reduce public transport and slow modes share. This particularly applies to private AVs, which are also leading to a more dispersed urban growth pattern. Shared automated vehicle fleets, conversely, could have positive impacts, including reducing the overall number of vehicles and parking spaces. Moreover, if it is assumed that automation would make the public transport system more efficient, AVs could lead to a favouring of urbanisation processes. However, results are very sensitive to model assumptions which are still very uncertain (e.g. the perception of time in AVs) and more research to gain further insight should have priority in future research as well as the development of the models and their further adaptation to AVs.

4.1.1. Introduction

Urban and settlement development has always been closely linked to transport and the development of technological mobility innovations. Whereas until the middle of the nineteenth century journeys were almost entirely by foot, the implementation of the rail and the car reshaped transport and settlement development. Land use and transport are interdependent and their interaction is underpinned theoretically in the so-called transport land use feedback cycle (Figure 1). Patterns of land use influence people’s activities, i.e. the choices and decisions for places to live, work and spend leisure time which in turn create a need of physical movement between these places (Bertolini, 2017). The desire to move between these different locations, based on the decisions concerning activities, is what generates transport or travel demand (Axhausen & Gärling, 1992; Jones, Dix, Clarke, & Heggie, 1983; Kitamura, 1988). This is accommodated by transport networks and is a key driver of network development and thus change in transport supply. The characteristics of the transport supply (e.g. capacity, costs, etc.) determine the accessibility of locations (Hansen, 1959) and with that their attractiveness for land use development, thus changing land use characteristics (Bertolini, 2017). Some of these interactions are direct or happening in a relatively short time, whereas others are observable only over the long-term. Moreover, as the system is dynamic on the left and the right-hand side of the cycle need to be considered simultaneously (Kasraian, Maat, Stead, & van Wee, 2016).

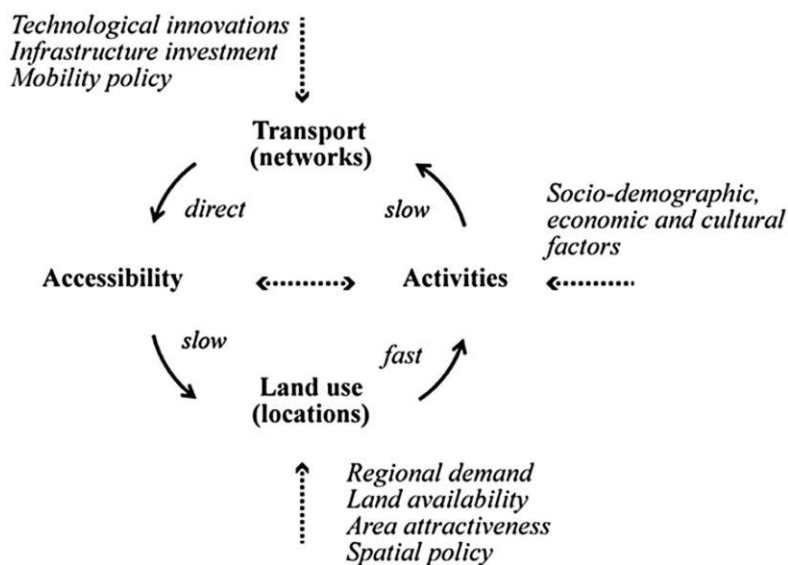


Figure 1. Transport land use feedback cycle (Wegener & Fürst, 1999; adapted by Bertolini, 2012)

However, this interaction should be seen as open-ended and its development co-determined by other factors. Land use developments do not only depend on accessibility conditions but also on the availability of land. For the emergence of activity patterns also individual characteristics of households and characteristics of the wider socio-economic context play a role. And finally, transport supply is not only determined by transport demand but also by infrastructure investments, mobility politics (policy and regulation) or technological innovations – such as automated vehicles (AVs) (Bertolini, 2017).

AVs are a technological innovation which will allow organising transport supply in a radically different way. Depending on the specific use case, existing transport services could either be complemented or replaced. Changes in the transport supply will mainly impact comfort, travel

time (e.g. driving time due to capacity increase (Ambühl, Ciari, & Menendez, 2016) or time for accessing and egressing the vehicles) and time use benefits (gain of productive time as nobody needs to steer the car), reliability, costs or operation costs and safety (Milakis, van Arem, & van Wee, 2017). Such changes in the transport supply will have impacts on accessibility and transport demand (Alessandrini, Campagna, Delle Site, Filippi, & Persia, 2015; European Commission, 2016). Initially, there will be impacts on travel behaviour, such as the type of activities, number of journeys, or the choice of transport mode. However, only in the long-term, there will likely be impacts on the location choice of households and firms and hence the settlement structure. Moreover, as the interaction of land use and transport is co-determined by other factors, there is an influence of individual characteristics and needs of households and firms (e.g. household formation), area attractiveness, land availability and supply of dwellings, mobility and land use related policy as well as other accompanying technological developments. Furthermore, the potential conversion of parking spaces due to AVs will affect the availability of land and the construction activity of investors and therefore the supply (and prices) of dwellings (Moreno, 2017). All in all, the impacts of AVs on the interaction between land use and transport are very complex.

This topic only recently started to get attention by researchers. Until lately the ongoing discourse on AVs focused predominantly on the technology. Investigating the impacts of AVs on travel behaviour and transportation systems has been widely popular in recent years, but how these would affect land use was long neglected, with the exception of several researchers who recently addressed the subject more or less explicitly (Milakis et al., 2017). As AVs are not yet available to the public at large, it is impossible to gather empirical data for further analysis and studies in the literature mainly apply various models and simulations to analyse the impacts of AVs (Milakis et al., 2017; Zhang, 2017). Those modelling studies mostly focus on traffic impacts, impacts on travel behaviour and impacts on land use (Correia, Milakis, van Arem, & Hoogendoorn, 2015).

This paper explicitly focuses on a review of modelling studies investigating the impacts of AVs on (1) travel behaviour, i.e. trip generation rate, mode choice and the possible mobilisation of new user groups due to AVs (e.g. impaired people and elderly), and (2) land use, i.e. location choices of people and firms and reductions in parking space due to the possibility of AVs substituting conventional vehicles and related reductions in fleet size, and summarizes their results with regard to these topics.

Modelling studies focusing on traffic impacts of AVs, i.e. dealing with traffic flow performance, road capacity, congestion, or wider societal or environmental implications, i.e. emissions, energy consumption, etc. (Milakis et al., 2017; Stocker & Shaheen, 2017) are outside the scope of this paper. As our focus lies on impacts on travel behaviour within the overall transport system, the latter also applies to studies investigating public's preferences only (e.g. using discrete-choice models).

In light of the growth of modelling studies investigating the impacts of AVs on travel behaviour and land use in recent years, synthesising current understandings to draw a comprehensive picture seems to be critical (Zhang, Guhathakurta, & Khalil, 2018). Key contributions of this paper are therefore (1) systematically collecting and reviewing such studies, (2) summarising their results, (3) derive insights on the key impacts and the interdependencies among them and (4) identify research gaps in the field and possible future avenues of research. To the best of our knowledge, it has not been done in such an exhaustive way before.

All studies reviewed were published in peer-reviewed journals between 2013 and 2018, however, also non-published studies presented at important conferences are incorporated.

Included are peer-reviewed journal articles listed in Scopus, which contained any combination of the following keywords: automated vehicle(s), autonomous vehicle(s), automated car(s), autonomous car(s), self-driving vehicle(s), self-driving car(s), transport, spatial, land use, parking, accessibility, sharing, modelling, travel demand model, agent-based model, activity-based model. Moreover, the search was also expanded to Google and Google Scholar. Evidence from several countries in different continents is used and compared.

The paper is divided into three parts. Section 2 reviews the basic characteristics of the studies like (a) topic, methodology and unit of analysis, (b) assumptions/ scenarios and (c) indicators. Section 3 summarizes the findings of the studies and elaborates how model assumptions may influence results. Finally, Section 4 provides a conclusion and identifies research gaps in the field and possible future avenues of research.

4.1.2. Study characteristics

This section mentions the basic characteristics of the studies. An overview of these characteristics with regard to the individual studies is provided in Table 1.

4.1.2.1. Study characteristics

Most of the modelling studies found in the literature and reviewed in this paper focus on the impacts of AVs on travel behaviour. These studies mainly use existing travel demand modelling methods, including trip-based models as well as activity and agent-based models. Several modelling studies focus on possible impacts on land use, mainly using integrated land use and transport models or focusing on the effects of AVs on accessibility. However, several studies also investigate both topics, for example looking at the possibility of AVs substituting conventional vehicles and related reductions in fleet size, implying impacts on parking land and therefore land use, but also describing possible impacts on travel behaviour.

In the reviewed studies the unit of analysis, i.e. the area where the models are applied for, ranges from a smaller part of a city to a whole country. Most studies investigate impacts of AVs based on real world network and local travel survey data. In some cases, studies also focus on a hypothetical grid-based city context (e.g. Zhang et al., 2015). In the latter case, travel behaviour is mostly simulated without actual local travel survey data: travel demand is recreated based on national trip characteristics and trip generation rates are assigned to each grid cell in the hypothetical city (Zhang, 2017).

A total of 37 modelling studies were reviewed with studies originating from the U.S.A. (20 studies), Europe (14 studies), Asia (2 studies) and Australia (1 study).

4.1.2.2. Scenarios/variables and model assumptions

Whereas some studies investigate the impacts of private AVs, others look at shared automated vehicles (SAVs) or a mix of both. Moreover, studies partly use different model assumptions, i.e. apply simplifications to recreate travel behaviours (see before), but also regarding vehicle speeds or sharing services priorities (Zhang, 2017).

Transport supply variables often include the share of trips which are made by SAVs sequentially (carsharing) or simultaneously (ridesharing). This is determined by (a) assuming a specific share, e.g. studies that investigate the replacement of all (e.g. Spieser et al., 2014) or a small share (e.g. Fagnant & Kockelman, 2014) of private vehicle trips by SAVs, (b) splitting trips by modes using a rule-based mode-choice model based on the existence/non-existence of public transport (e.g. ITF, 2015) or (c) incorporating assumptions on SAVs such as pricing

structure, etc. (see below) in the mode-choice model, looking also on possible shifts in mode choices (e.g. Hörl et al., 2016). Moreover, the studies on SAVs include model assumptions on how SAVs are assigned to serve calling clients, i.e. the vehicle dispatching model (e.g. first-come first-served or demand-supply balancing dispatching strategy), assumptions on the relocation of the vehicles (e.g. Fagnant & Kockelman, 2014), the size of SAVs, as well as assumptions on acceptable waiting times for the users. In addition, assumptions on the acceptance of longer trip durations due to the pick-up of other passengers (see e.g. Bourghout et al., 2014), when matching clients with similar itinerary to share rides, are made in the case of ridesharing (Zhang, 2017).

A recurring assumption is the reduction of the value of time or travel time (VOT) due to AVs, because of the increased comfort, reduced stress and increased productivity while travelling as a passenger instead of as a driver (e.g. Childress et al., 2015).

Another frequent assumption is an increase in road capacity due to AVs. This assumption is mostly used in modelling studies investigating the impact of private AVs (e.g. Gucwa, 2014). Studies looking at the impact of SAVs however mostly didn't incorporate effects on road capacity. Moreover, especially earlier studies did not consider congestion (and explicit traffic assignment) and built upon rather great simplifications regarding the link travel speeds with regard to the time of the day (Levin et al., 2017; Zhang, 2017).

In addition, a couple of studies include and investigate possible models and assumptions on operating and parking costs of private AVs and SAVs (e.g. Chen & Kockelman, 2016). While in most of the studies the scenarios are defined through assumptions regarding private AVs and SAVs only, some studies (e.g. Gelauff et al., 2017) make assumptions also regarding public transport. Moreover, while some studies focused on the aspects mentioned above, in some cases several such assumptions were combined.

4.1.2.3. *Indicators*

Several indicators are used to examine the impacts of AVs on travel behaviour and land use. Regarding travel behaviour, mostly changes in vehicle miles travelled (VMT) or vehicle kilometres travelled (VKT) and changes in mode shares are used as impact indicators (e.g. Hörl et al., 2016). Some studies also use indicators such as travel time changes, i.e. vehicles hours travelled (VHT) (e.g. Childress et al., 2015).

Regarding land use impacts, studies focusing on reductions of parking land use the change in the number of parking spaces as an impact indicator, calculated by investigating the change in the number of vehicles, i.e. the AVs fleet size, to process the current transport demand and using a specific parking space per car ratio (e.g. Zhang et al., 2015). However, also studies not using a specific parking space per car ratio but only investigating the change in the number of vehicles to process the current transport demand (e.g. Boesch et al., 2016) imply possible changes in parking needs and therefore parking space needed and ultimately would make land reclaim and land use changes possible. Studies focusing on location choices of people and firms mostly investigate the population development (e.g. Gelauff et al., 2017) or changes in job density (e.g. Zhang, 2017) in different areas of the study region. Zhang (2017) uses changes in the median distance of household locations to the central business district (CBD). Meyer et al. (2017) investigate changes in accessibility for municipalities, implying land use impacts.

Table 1. Summary of study characteristics and results on impacts of AVs on travel behaviour and land use.

Author(s) (year)	Study region/area	Methodology	Main model assumptions	Scenarios/ assumptions on transport supply	Main Results
Burns Jordan and Scarborough (2013)	Ann Arbor USA	Queuing and simulation Models	Constant travel speed with peak hour factors; Grid network; avg waiting time: 0.4 min	Replacement of all trips of vehicles driven less than 70 miles/day with SAVs	85% vehicles
Kornhauser (2013)	New Jersey USA	Activity based Model	Constant travel speed Grid network	Replacement of all private vehicle trips with SAVs (ridesharing) with pick up stations	46% vehicles
Bourghout Rigole and Andreasson (2014)	Stockholm Sweden	Hybrid micro mesoscopic traffic simulation Model	Link speeds as 75% of free flow speeds for trip assignment model	Replacement of all home based work private vehicle trips with SAVs Replacement of all home based work private vehicle trips with SAVs (ridesharing); acceptable travel time increase 30% to 50%	+24% VKT; 92% vehicles 11% to 24% VKT; +13 25% VHT 95% vehicles
Fagnant and Kockelman (2014)	Hypothetical city USA	Agent based Model	Constant travel speed for peak/off peak; Grid network; avg waiting time: 0.3 min	3.5% of trips served by SAVs	+11% VMT 91% vehicles
Gucwa (2014)	San Francisco USA	Activity based Modelling approach	Mode Choice Model	+100% road capacity 100% VOT for private AVs +10% to +100% road capacity 25% to 100% VOT for private AVs	+2% VMT +13% VMT +4% to +15% VMT
Spieser et al (2014)	Singapore Singapore	Design oriented approach	Avg travel speed is periodically time varying	Replacement of all private vehicle trips with SAVs	66% vehicles
Childress Nichols Charlton and Coe (2015)	Seattle USA	Activity based Model	Mode and Trip Choice Model Capacity changes for freeways and major arterials	+30% road capacity +30% road capacity 35% VOT (household trips) for private AVs +30% road capacity 35% VOT 50% parking cost for private AVs SAVs with cost of \$1.65/mile (no private vehicle trips possible)	+4% VMT; 4% VHT +5% VMT; 2% VHT +20% VMT; +17% VHT 0.3 and 1.6 percentage points in PT and walk share +35% in VMT; 41% in VHT +4 and +5 percentage points in PT and walk share
Fagnant Kockelman and Bansal (2015)	Austin USA	Agent based Model	Hourly varying link level travel speeds	1.3% of regional trips served by SAVs	+8% VMT 89% vehicles
TF (2015)	Lisbon Portugal	Agent based Model	Link travel speed based on trip assignment Rule based Mode Choice Model based on existence/non existence of PT Three different sizes of SAVs	Replacement of all motorised trips by SAVs Replacement of all motorised trips by SAVs (ridesharing)	+44% to +89% VKT; 84% to 89% parking spaces 77% to 83% vehicles +6% to +22% VKT; 93% to 94% in parking spaces 87% to 90% vehicles
Kim Rousseau Freedman and Nicholson (2015a)	Atlanta USA	Activity based Model	Mode and Trip Choice Model	+50% road capacity +50% road capacity 50% VOT for private AVs	+4% VMT +13% VMT

Author(s) (year)	Study region/area	Methodology	Main model assumptions	Scenarios/ assumptions on transport supply	Main Results
				50% VOT +50% road capacity 71% operating and 100% parking cost for private AVs	+24% VMT; +12% VHT; 0.8 percentage points in PT share
Kim Yook Ko and Kim (2015b)	Seoul South Korea	Agent based Model	Travel behaviour and residential location choices incl locational preference factors	increase in road capacity 100% market share of private AVs Preference for road and city centre accessibility and low price regions	More dispersed development of urban space
Zhang Guhathakurta and Fang (2015)	Hypothetical city USA	Agent based Model	Constant travel speed for peak/off peak; Grid network; Avg Waiting Time: 2 min	2% of trips served by SAVs	90% parking spaces
Bischoff and Maciejewski (2016)	Berlin Germany	Agent based Model	Time varying link travel times Demand supply balancing dispatching strategy Max waiting time: 15 min	2% of trips served by SAVs (car and ridesharing) Replacement of all private vehicle trips by SAVs	91% parking spaces 91% vehicles
Boesch Ciari and Axhausen (2016)	Zurich Switzerland	Agent based Model	Travel times from MATSim for actual trips Max waiting time: 10 min	Replacement of all private vehicle trips by SAVs	90% vehicles
Chen Hanna and Kockelman (2016)	Hypothetical city USA	discrete time Agent based Model	Constant travel speed for peak/off peak; Grid network Avg waiting time: 7 to 9 min	10% of trips served by SAVs	+7% empty VMT; 87% vehicles
Chen and Kockelman (2016)	Hypothetical city USA	discrete time Agent based Model	Constant travel speed for peak/off peak; Multinomial logit Mode Choice Model Grid network; avg waiting time: 3 min	10% of trips served by electric SAVs (with recharge time and vehicle range) 65% VOT \$0.85/mile operating cost for SAVs (with battery recharge time and vehicle range)	+7% to +14% empty VMT; 85% to 73% vehicles 25 percentage points in car share 3 percentage points in PT share
Correia and van Arem (2016)	Delft Netherlands	Assigning private AV trips to road network	Mode Choice Model Travel times change after trip assignment	Replacement of private vehicles with private AVs in households Replacement of private vehicles with private AVs in households 50% VOT for private AVs	+17% VMT; +3 percentage points in car share 49% VMT; +9 percentage points in car share
Fagnant and Kockelman (2016)	Austin USA	Agent based Model	Hourly varying link level travel speeds Avg waiting time carsharing: 1.9 min Avg waiting time ridesharing: 1.2 to 1.4 min	1.3% of regional trips served by SAVs 1.3% of regional trips served by SAVs (ridesharing) Acceptable travel time increase for ridesharing 20% to 40%	+9% VMT; 90% vehicles +2% to +5% VMT 90% to 91% vehicles
Friedrich and Hartl (2016)	Stuttgart Germany	Macroscopic and microscopic travel demand Model	Link travel speed based on trip assignment Rule based Mode Choice Model based on existence/non existence of PT Two different sizes of SAVs	Replacement of all motorised trips by SAVs Replacement of all motorised trips by SAVs (ridesharing)	+18% to +39% VMT; 77% to 81% vehicles 77% to 83% parking spaces 20% to +36% VMT; 90% to 93% vehicles 90% to 93% parking spaces

Author(s) (year)	Study region/area	Methodology	Main model assumptions	Scenarios/ assumptions on transport supply	Main Results
Hörl Erath and Axhausen (2016)	Sioux Falls USA	Agent based Model	Time varying link travel times Demand supply balancing dispatching strategy Mode Choice Model; max waiting time: 17 min	65% VOT \$0 85/mile cost for SAVs	+60% VMT; 20 percentage points in private car share 10 and 8 percentage points in PT and walk share
Thakur Kinghorn and Grace (2016)	Melbourne Australia	Land Use and Transport interaction Model	Travel behaviour and residential location choices with accessibility to employment as explanatory variable	50% VOT for private AVs Replacement of private vehicles with SAVs (ridesharing) with 0 49€/km operating cost	+4% population in inner parts of the city 3% population in the far outer suburbs 4% population in inner parts of the city +3% population in the far outer suburbs
Auld Sokolov and Stephens (2017)	Chicago USA	Activity based travel demand Model	Mode and Trip Choice Model Link travel speed based on trip assignments	+12% to 77% road capacity 25% to 75% VOT 20% market share of private AVs 25% to 75% VOT 75% market share of private AVs +77% road capacity 25% to 75% VOT 100% market share of private AVs	+1% to +4% VMT +2% to +18% VMT +10% to +59% VMT +21% to +79% in VMT
Bangemann (2017)	Munich Germany	Microscopic travel demand Model	SAVs with two seats	Replacement of all private vehicle trips with electric SAVs (with recharge time and vehicle range)	+14% VMT 91% vehicles
Gelauff Ossokina and Teulings (2017)	Netherlands	Land Use transportation interaction Model	Home and job location and commuting mode choices incl prices accessibility of jobs travel costs	20% VOT and travel time for private AVs 20% travel time (compared to private car) 100% out of vehicle travel time for PT 50% access/ egress time of trains	1% population in big cities; 2 5% population in mid sized cities; +1% population in non urban regions +3% in population in big cities; 3% population in suburbs of smaller cities; 2% population in non urban regions
Heilig Hilgert Mallig Kagerbauer and Vortisch (2017)	Stuttgart Germany	Agent based travel demand Model	Combined Destination and Mode Choice Model Avg waiting time: 7 5 min	45% cost/mile compared to private car for SAVs (ridesharing) 70% cost/mile with occupation rate >=1 64	20% VMT; 85% vehicles; +4 percentage points in PT share; +8 and +5 percentage points walk and cycle share
Levin Kockelman Boyles and Li (2017)	Austin USA	Cell transmission model based dynamic network loading simulator	Link travel speed based on traffic flow simulator; Waiting time: 10 min	Replacement of all private vehicle trips with SAVs	72% vehicles
Martinez and Viegas (2017)	Lisbon Portugal	Agent based Model	Link travel speed based on trip assignment Rule based Mode Choice Model Max waiting and travel time increase: 15 min	Replacement of all motorised trips by SAVs (ridesharing) Replacement of all motorised trips by SAVs (ridesharing) and taxi buses (8 16 seats boarding at specific points)	25% VKT; 95% vehicles 29% VKT 97% cars +568% buses

Author(s) (year)	Study region/area	Methodology	Main model assumptions	Scenarios/ assumptions on transport supply	Main Results
Meyer Becker Boesch and Axhausen (2017)	Switzerland	Travel demand Model (macroscopic)	Land use effects based on accessibility changes to work places Link level travel speed based on trip assignments AV availability for children adults without driver license and elderly people	+80% road capacity outside urban areas +40% in urban areas (private AVs) +80% road capacity outside urban areas +40% in in urban areas (SAVs)	Minor gains in accessibility for rural municipalities no change/small decrease in greater cities Moderate accessibility gains in rural municipalities decrease in larger agglomerations
Liu Kockelman Boesch and Ciari (2017)	Austin USA	Agent based Model	Time varying link travel times Mode Choice Model Avg waiting time: 3 min	50% VOT \$0 5/mile operating costs for SAVs	+9 8% empty VMT; SAV fleet = 17% of travellers
				50% VOT \$0 75/mile operating costs for SAVs	+13 2% empty VMT; SAV fleet = 15% of travellers
				50% VOT \$1/mile operating costs for SAVs	+15 7% empty VMT; SAV fleet = 13% of travellers
Llorca Moreno and Moeckel (2017)	Munich Germany	Agent based Model	Time varying link travel times Demand supply balancing dispatching strategy Average waiting time: 8 min	50% VOT \$1 25/mile operating costs for SAVs	+15 1% empty VMT; SAV fleet = 13% of travellers
				Replacement of 20% of private vehicle trips with SAVs	+5% VMT; 14% vehicles (overall)
Zhang (2017)	Atlanta USA	Agent based Model combined with Monte Carlo simulation and UrbanSim	Residential and employment location choices determined by commute transportation cost (residential) and human capital accessibility available commercial and industrial spaces (employment) incl locational preference factors Constant travel speed for different periods	Replacement of 40% of private vehicle trips with SAVs	+7% VMT; 28% vehicles (overall)
				Replacement of all private vehicle trips with SAVs 100% VOT \$0 3/mile operating costs for SAVs	+7% to +10% in median distance to CBD for households with young people (kids/no kids) 7% to 2% in median distance to CBD for households with old people (kids/no kids)
Zhang and Guhathakurta (2017)	Atlanta USA	Agent based travel demand Model	Constant travel speed for different day periods; Avg Waiting Time: 3 8 min	Replacement of all private vehicle trips with SAVs 100% VOT \$0 13/mile to \$0 5/mile operating costs for SAVs 90% parking spaces	1 8% to 17 5% job density in inner city parts and +0 2% to +9 8% job density in suburban area for secondary sector +0 3% to +11 8% job density in inner city parts and 2 5% to 7 8% job density in suburban area for tertiary sector
				5% of trips served by SAVs (car and ridesharing); 100% parking cost \$0 5/minute operating costs (carsharing) and \$0 3/minute (ridesharing)	4 5% in parking land
Zhao and Kockelman (2017)	Austin USA	Travel demand Model (traditional trip based four step Model)	Hourly varying link travel speeds (congested time information) Mode Choice Model	25% to 75% VOT for private AVs and SAVs 1\$/mile operating cost (private AVs) and 1 5\$/mile (SAVs)	+18% to +41% VMT

Author(s) (year)	Study region/area	Methodology	Main model assumptions	Scenarios/ assumptions on transport supply	Main Results
Auld Verbas Javanmardi and Rousseau (2018)	Chicago USA	Activity based travel demand Model	Mode and Trip Choice Model Fleet penetration based on model (AV cost) Link level travel speed based on trip assignments	50% in VOT 50% to 100% parking cost for private AVs and SAVs 1\$/mile operating cost (private AVs) and 1.5\$/mile (SAVs)	+26% VMT
				50% in VOT for private AVs and SAVs 1\$/mile operating cost (private AVs) and 1\$/mile (SAVs)	+28% VMT
				50% in VOT for private AVs and SAVs 1.5\$/mile operating cost (private AVs) and 1.5\$/mile (SAVs)	+29% VMT
				47.8% to 100% fleet penetration of private AVs	+6% to +8% VMT
Boesch Ciari and Axhausen (2018)	Zug Switzerland	Agent based Model	Time varying link travel times Mode Choice Model	30% VOT 13.4% to 100% fleet penetration of private AVs	+15% to +24% VMT
				50% VOT 13.4% to 100% fleet penetration of private AVs	+21% to +43% VMT
Kröger Kuhnimhof and Trommer (2018)	Germany and USA	Aspatial travel demand Model	Travel speeds constant to today Combined mode and distance choice (No traffic assignment) AV market share based on diffusion model AV availability for teenagers adults without driver license and mobility impaired people	38% VOT for private AVs 54% VOT for SAVs +25% operating cost for private AVs (0.22CHF/km); 50% operating cost for automated PT (0.13CHF/km); 0.46 CHF/km operating cost for SAVs	+16% VMT 12 percentage points in private car share 4 and 16 percentage points in PT and slow modes share
				25% VOT for private AVs 7.5% market share	+3.4% in VKT; +1.3 and 0.2 percentage points in car and PT share
				25% VOT for private AVs 29.3% market share	+8.6% in VKT; +3.8 and 0.4 percentage points in car and PT share
				25% VOT for private AVs 10.1% market share	+2.4% in VKT; +1 and 0.3 percentage point in car and PT share
Zhang et al (2018)	Atlanta USA	Activity based travel Model	Varying link travel speeds (congested time information); no trip delay	25% VOT for private AVs 37.6% market share	+8.6% in VKT; +3.7 and 0.9 percentage points in car and PT share
				Replacement of private vehicles with private AVs in households determined by min number of AVs to satisfy travel demand of household members	+13.3% empty VMT 9.5% vehicles

4.1.3. Results of the studies

4.1.3.1. Impacts on travel behavior

4.1.3.1.1. Vehicle miles travelled (VMT)/vehicle kilometers travelled (VKT)

Studies mostly indicate an increase of VMT or VKT due to AVs. Regarding private AVs, studies (e.g. Auld et al., 2017; Gucwa, 2014; Kim et al., 2015a) report higher increases in VMT (about 15–59%) resulting from migration effects from other modes, when a high reduction of the value of time, a reduction in parking costs and high market shares of AVs are assumed. However, assumptions on an increase in road capacity seem to contribute less to additional VMT (about +1–4%). Kim et al. (2015a) for example – who use a mode and trip-choice model and assume a change in road capacity by +50% – indicate an increase in VMT by 4% for the Atlanta region in the U.S.A. However, a higher increase in VMT of 24% is reported, when also changes of the value of time by –50% and vehicle operating (–71%) and parking costs (–100%) for private AVs compared to current private cars are assumed.

Studies on SAVs (e.g. Childress et al., 2015; Hörl et al., 2016; Liu et al., 2017) also mainly report that SAVs lead to an increase in VMT because of empty trips and migration effects from other modes. High additional VMT (about 35–60%) is reported in particular, when a high reduction in the value of time and low costs for SAVs are assumed. Hörl et al. (2016) for instance use a mode-choice model as well as assumptions on operating costs of SAVs of \$0.85 and on a reduction of the value of time by 65% compared to current private cars and report an increase of VMT by 60% for the city of Sioux Falls in the USA. Studies that assume a replacement of private vehicle trips by SAVs based on assuming a specific share or by splitting trips by modes using a rule-based mode-choice model, i.e. not modelling a competition with existing modes (e.g. Chen et al., 2016; Fagnant et al., 2015; Fagnant & Kockelman, 2014; Friedrich & Hartl, 2016; ITF, 2015), also indicate an increase in VMT. This increase is in the magnitude of about 8–10%, when assuming that only a small share (1.3–10%) of private vehicle trips is replaced by SAVs and results from additional empty trips. ITF (2015) and Friedrich and Hartl (2016) however, splitting trips by modes based on the existence/non-existence of public transport, also report higher increases in VKT (39–89%), when assuming that all private vehicles are replaced by SAVs and public transport is non-existent.

However, several studies (e.g. Bourghout et al., 2014; Heilig et al., 2016; Martinez & Viegas, 2017) also indicate that SAVs could decrease VMT (about 10–25%) if a large share of the travellers is willing to rideshare. For example, Bourghout et al. (2014) assume the replacement of all home-based work private vehicle trips by SAVs with ridesharing and report a decrease of VKT by 11–24% dependent on the acceptable increase of travel time (+30% to +50%) due to ridesharing. Moreover, a decrease in VMT is reported when costs per mile for SAVs are high and travellers opt for short trips: Childress et al. (2015) use a mode and trip-choice model and report that VMT experience a reduction by 35% for the Seattle region in the USA, when costs per mile of \$1.65 for SAVs as well as no possibility of using private vehicles are assumed.

4.1.3.1.2. Mode/modal share

Studies that investigate impacts on mode share by modelling a competition of AVs with currently existing modes mostly indicate that AVs lead to a reduction in public transport and slow modes share. For private AVs, studies (e.g. Correia & van Arem, 2016; Kim et al., 2015a; Kröger et al., 2018) particularly report larger mode shifts, when a high reduction of the value of time and a reduction in parking or operating costs (as well as high penetration rates) are

assumed, leading to an increase in private car modal split. Kröger et al. (2018) for example use a combined mode and distance-choice model and assume a reduction in the value of time by 25%, different penetration rates for private AVs (based on a diffusion model) and private AV availability for teenagers, adults without driving license and mobility-impaired people. They report a decrease in public transport share from 2.6% to 2.2% and an increase in car share from 65.6% to 69.4% (penetration rate=29.3%) for the USA as well as a decrease in public transport share from 8.6% to 7.7% and an increase in car share from 45.1% to 48.8% (penetration rate=37.6%) for Germany.

Similarly, for SAVs, studies (e.g. Boesch et al., 2018; Chen & Kockelman, 2016) particularly indicate a reduction in public transport and slow modes share when assuming a high reduction in the value of time and rather low operating costs. This is even the case if lower operation costs for public transport are also assumed. Instead of private AVs however, SAVs also lower the private car modal split. For example, Boesch et al. (2018) use a mode-choice model based on assumptions on the reduction of the value of time for SAVs by 54% compared to current private cars as well as operating costs of 0.46 CHF/km (and assumptions regarding a reduction of the value of time for private AVs and operating costs for private AVs and public transport). They indicate a reduction in public transport share from 16% to 12%, a decrease in slow modes share from 26% to 20% and a decrease in private car share from 48% to 36%.

However, studies on SAVs which assume a complete ban of privately owned vehicles and specific (rather high) operating costs (e.g. Childress et al., 2015; Heilig et al., 2016) also report increases in public transport and slow mode shares because of people using the latter modes especially for short trips to avoid costs. Heilig et al. (2016) for example use a combined destination and mode-choice model and assume a reduction of operating costs for SAVs with ridesharing by 45% compared to current cars as well as no possibility of using private vehicles. They report that increases in public transport share (from 13% to 17%) and in walk share (from 22% to 31%) are indicated even when operating costs for SAVs are reduced compared to current cars.

4.1.3.1.3. Vehicle hours travelled (VHT)

Regarding the impacts of AVs on VHT, studies (e.g. Childress et al., 2015; Kim et al., 2015a) mostly indicate that VHT seems to increase with private AVs if these are assumed to imply a high reduction in the value of time and a reduction in parking costs. In contrast, SAVs could reduce VHT if these are accompanied with high costs and there is no possibility to use private vehicles: Childress et al. (2015) for instance use assumptions on changes in road capacity (+30%), the value of time (-35%) and parking costs (-50%) for private AVs compared to current private cars and indicate an increase in VHT of up to 17%. However, when assuming costs per mile of \$1.65 for SAVs (no ridesharing) and no possibility of using private vehicles, a decrease in VHT by 41% is reported.

4.1.3.2. *Impacts on travel behavior*

4.1.3.2.1. Parking Spaces (including number of vehicles to process the travel demand – fleet size)

Impacts of AVs on parking spaces were found to be quite large, either explicitly calculated by applying a specific parking space to car ratio to the modelled impact on the change in the number of vehicles to process the travel demand or by implying impacts on parking land from the latter. Most studies (e.g. Bischoff & Maciejewski, 2016; Chen et al., 2016; Fagnant et al.,

2015; Martinez & Viegas, 2017; Spieser et al., 2014) investigated a replacement of all or a specific share of current private vehicle trips by SAVs and suggest that this could substantially (up to around 90%) reduce the number of vehicles to process the current transport demand (with regard to the replaced trips) and even more so, if ridesharing is also assumed, implying reduced parking needs. Bischoff and Maciejewski (2016) for example focus on the city of Berlin in Germany and indicate that replacing all private vehicle trips with SAVs reduces the number of vehicles to process the current private vehicle demand by 91%. Regarding SAVs with ridesharing, Martinez and Viegas (2017) report a reduction in the number of vehicles to process the travel demand by 95% for the Lisbon region, when assuming SAVs with ridesharing replacing all motorised trips. Several studies (e.g. ITF, 2015; Zhang et al., 2015; Zhang & Guhathakurta, 2017) also calculated the impacts on parking spaces explicitly by using a specific parking space to car ratio and mostly report nearly equal reductions of the number of parking spaces (around 80–90%) with regard to the number of vehicles to process the current travel demand. Similarly, assuming ridesharing further reduced the number of parking spaces needed. Zhang et al. (2015) for example focus on a hypothetical grid-based city and report a reduction in the number of needed parking spaces by 90% with regard to the 2% of trips they assumed being served by SAVs; when assuming half of these trips with ridesharing, the reduction was even higher (91%).

However, if private ownership is assumed, i.e. private AVs that are shared within the household, with otherwise similar assumptions, only a much smaller reduction in the number of vehicles to process the travel demand would be possible, implying also smaller impacts on parking spaces: Zhang et al. (2018) assume that the replacement of private vehicles with AVs in households is determined by the minimum number of AVs to satisfy the travel demand of all household members with no trip delay and report only a reduction in the number of vehicles by 9.5% for the Atlanta region in the U.S.A.

4.1.3.2.2. Location choices of people and firms

Concerning impacts of AVs on location choices of people and with regard to private AVs, studies (e.g. Gelauff et al., 2017; Kim et al., 2015b; Meyer et al., 2017; Thakur et al., 2016) mostly show that these lead to an increase in accessibility and an increase in population in well-connected far outer suburbs and rural regions. These processes of sprawling and more dispersed development of the settlement structure are reported in particular, when a high reduction of the value of time, an increase in road capacity and (related) reductions in travel time are assumed. Thakur et al. (2016) for example model travel behaviour and residential location choices (determined by the accessibility to employment) for the Melbourne region in Australia in the year 2046 and assume a reduction of the value of time for private AVs by 50% compared to current cars. They report a reduction of the population of 4% in inner parts of the city and an increase of 3% of the population in the far outer suburbs.

Studies on SAVs (e.g. Meyer et al., 2017; Zhang, 2017) mainly report that SAVs could curb urban sprawl, however, effects are mixed, as some population groups might also locate further away because of increased accessibility in more rural areas. This is especially the case when a reduction in the value of time and an increase in road capacity are assumed. Zhang (2017) for example investigated the impacts of SAVs on residential location choices in the Atlanta region in the USA and reports a decrease in median distance to CBD for older people (kids/no kids) by 2–7% but an increase of younger people (kids/no kids) by 7–10%, when assuming a replacement of all private vehicle trips by SAVs, operating costs of \$0.3/mile and a reduction in the value of time by 100% of SAVs compared to current private cars. However, when SAVs

with ridesharing but no changes in the value of time are assumed, the concentration of population in urbanised regions, i.e. urbanisation processes, are reported: Thakur et al. (2016) assume a replacement of all private vehicle trips with SAVs with ridesharing as well as operating costs of 0.49€ per km and report an increase in population by 4% in inner parts of the city, while far outer suburbs experience a reduction of the population by 3%.

Similarly, an inclination towards urbanisation processes is indicated when a more efficient public transportation system due to automatization (e.g. AV shuttles for the last mile) and related reductions in travel time are assumed: Gelauff et al. (2017) focus on the modelling of home and job location as well as commuting mode choices in the Netherlands and assume a reduction of travel time by 20% (compared to current private cars) and out-of-vehicle travel time by 100% for public transport as well as a reduction in access/ egress times of trains by 50%. They indicate an increase in population in large cities by 3% as well as a population decline in suburbs of smaller cities by 3% and in non-urban regions by 2%.

Regarding impacts of AVs on location choices of firms, it is indicated that SAVs, when assumed with a reduction in the value of time and a reduction in parking spaces, seem to contribute to further deindustrialisation trends in cities, i.e. firms of the secondary sector locating outside of cities: Zhang (2017) uses the same assumptions as above but operation costs for SAVs of \$0.13/mile to \$0.5/mile as well as a reduction in parking spaces by 90% and reports a decrease in job density by 1.8–17.5% in inner city parts and an increase by 0.2–9.8% in suburban areas for the secondary sector, such as construction or manufacturing. For the tertiary sector, such as service or public, an increase in job density in inner parts of the city by 0.3–11.8% and a decrease in suburban areas by 2.5–7.8% is observed.

4.1.3.3. *Influence of results by model assumptions*

As expected, the results confirm that impacts of AVs on travel behaviour and land use are strongly dependent on the assumptions made. The most frequently used assumptions concerned the share of trips that are replaced with SAVs and the waiting time of users, the changes in the value of time, the increase in road capacity and the penetration rate of AVs. Moreover, the modelling technique used and in particular the simplifications or assumptions for modelling applied to play an important role.

Whereas especially early studies investigated impacts on travel behaviour based on the assumption that activity pattern will not change after introducing SAVs (Zhang, 2017), more recent studies on SAVs, private AVs or a mix of both mostly use mode-choice models (combined with trip and destination choice) and also investigate and consider shifts in modal shares due to the assumptions made. Moreover, only a few studies (e.g. Kröger et al., 2018) incorporated the mobilisation of new user groups, i.e. additional changes in travel behaviour because of AV availability for children/teenagers, adults without driver license or mobility-impaired people.

Concerning assumptions on the transport supply with AVs, assumptions on a reduction of the value of time seem to have a higher influence on the impacts than assumptions on an increase in road capacity or on operating costs (e.g. Boesch et al., 2018). Moreover, for the impacts of SAVs on travel behaviour especially assumptions regarding the level of service acceptance, in terms of waiting and trip time, by passengers of SAVs plays an important role. The studies assume different waiting times a passenger would accept for being picked up. Average waiting time varies between about 0.3 minutes (Fagnant & Kockelman, 2014) and 8 minutes (Llorca et al., 2017). These imply also different (maximum) waiting times at peak time, which were up to more than 17 minutes (e.g. Hörl et al., 2016). For ridesharing, also the acceptable travel

time increase plays a role (e.g. Burghout et al., 2014). In addition, Chen et al. (2016) indicate that charging processes are important, when assuming electric SAVs. Moreover, assumptions on the vehicle dispatching model (e.g. first-come first-serve principal or demand-supply balancing dispatching strategy), the relocation of the vehicles and model simplifications or assumptions such as using grid-networks instead of local transportation networks or constant travel speeds at specific day times instead of being based on a traffic assignment and traffic flow simulator to incorporate congestion play a role.

All these factors have a direct link to the impacts of SAVs on travel behaviour, i.e. VMT, and land use, i.e. the number of parking spaces needed based on the number of SAVs needed to process the travel demand. Especially earlier modelling studies that used grid-based networks and constant travel speeds – and therefore used a lot of simplifications in modelling – may over-predict the number of SAVs to process the travel demand (Levin et al., 2017). In addition, Boesch et al. (2016) further look at the trips generated outside the study area and show that high reductions in the number of SAVs to process the travel demand are not realistic unless the level of service is reduced.

4.1.4. Conclusion and recommendations for future research

This paper systematically reviewed modelling studies investigating the impacts of AVs on travel behaviour and land use and summarised their results, which has not been done in such an exhaustive way before. It shows that several initial studies of this kind have been carried out for cities and regions worldwide, especially in the U.S.A. and in Europe.

The results indicate that AVs are mostly found to increase VMT and lead to reductions of the public transport and slow modes share, especially when private AVs or SAVs without ridesharing and a high reduction in the value of time are assumed. However, (a high share of) SAVs could significantly reduce the number of vehicles necessary to process the current travel demand, especially when ridesharing is assumed, which could result in less parking spaces needed, which could allow reclaiming such space and giving it a different use. Regarding land use effects based on changes in location choices of people and firms, studies mainly illustrate that private AVs – especially when a reduction of the value of time and capacity increases are assumed – lead to increases in population in well-connected distant suburbs and rural regions, i.e. a much more dispersed and scattered urban growth pattern. However, SAVs in combination with a ridesharing scheme (and no changes in the value of time) or a more efficient public transportation system due to automatisisation (e.g. AV shuttles for the last mile) could lead to an increase in population in urban areas, i.e. population clustering in urban areas. In this regard, it should be also considered that such models generally do not have high spatial detail and tend to differentiate only between urban and suburban areas and therefore such results may be also the product of an oversimplification and more complex patterns may arise with more sophisticated modelling approaches in the future.

However, the paper also found that results are strongly dependent on model assumptions: impacts assessed by the models appear to be particularly sensitive to a reduction in value of time as compared to increases of road capacity or operating costs. Moreover, different model simplifications (especially in earlier studies) lead to overestimations regarding the possible reduction of the number of vehicles or parking spaces needed due to SAVs.

In addition, different results based on nearly the same assumptions in several studies dealing with different contexts strongly suggest that the settlement structure plays an important role. Trip durations and distances differ from city to city and in less densely areas (suburban, rural)

more empty rides would be carried out and thus, comparatively, more vehicles would be needed to replace the current fleet (Bischoff & Maciejewski, 2016). However, studies particularly focusing on rural areas have hardly been conducted so far and more research on this aspect seem to be crucial to understand such differences. Furthermore, studies mostly investigated the impacts of highly advanced AVs, i.e. AVs that could operate in all contexts of the city (region). However, in the near future only the deployment of AVs in specific operational design domains, i.e. specific conditions and contexts (SAE International, 2018), seems feasible (Beiker, 2018). This should be specifically considered in future studies.

The studies reviewed are a first step to investigate the possible impacts of AVs on travel behaviour and land use. However, more work is needed to better understand them. Future research should grant a better insight on the socio-demographic groups which will benefit from increased accessibility due to automated driving – a first step being the work of Zhang (2017) in the context of modelling location choices. For instance, working in a car is not possible for all jobs and is especially dependent on future working models: Cyganski, Fraedrich, and Lenz (2015) – conducting a stated preference survey on the use of AVs – indicate that only 13% of respondents reported the ability to work as an advantage of AVs, that being especially the case for persons with higher income. And this is even without taking into account that acceleration patterns of cars (especially later acceleration) might limit the ability to do so (Le Vine, Zolfaghari, & Polak, 2015). Therefore, more empirical research is needed on generalised travel costs and the perception of time in AVs in the future, especially when other passengers are in the vehicle (ridesharing).

These aspects have to be incorporated in future models, e.g. by integrating new and preferably socially differentiated survey results regarding such preferences that include AVs rather as a developing pathway than a fully formed mode alternative (stated adoption). Moreover, the model structures should be further adapted, e.g. by taking into account the inter-temporal nature of AV adoption and including path dependencies (Hawkins & Habib, 2018; Zhang et al., 2018).

As future remains unknown and technologies advance especially in the area of sensors, other aspects not yet mentioned could become important too. For example, ridesharing could be very different from today: matching-algorithms on top of considering start and destinations points and possible routes of users could also integrate a social-emotional matching of passengers since sharing a ride is more attractive with socially and emotionally similar people. The service by BlaBlaCar can be considered a first attempt in this direction (BlaBlaCar, 2018). Also, different use cases of AVs are conceivable, with vehicles (e.g. sizes, etc.) that are completely different from those today. Therefore, impacts on travel behaviour and land use could then be totally different of those presented in the reviewed studies.

In summary, the studies reviewed to provide the best existing insight on the topic as of today and the synthesis provided by this paper can be useful for both policy-makers and researchers. Although results are overall not solid enough to rely on them to base policies upon, the causalities observed are recurrent enough that they can at least give some useful insight on where the system would head to under specific circumstances. For researchers, this can give hints on which aspects of the existing studies would need to be pursued more in depth and which have been neglected so far and should be pursued in the future.

4.1.5. References

- Alessandrini, A., Campagna, A., Delle Site, P., Filippi, F., & Persia, L. (2015). Automated vehicles and the rethinking of mobility and cities. *Transportation Research Procedia*, 5, 145–160.
- Ambühl, L., Ciari, F., & Menendez, M. (2016). What about space? A simulation based assessment of AVs impact on road space in urban areas. Paper presented at the 16th Swiss transport research conference.
- Auld, J., Sokolov, V., & Stephens, T. S. (2017). Analysis of the effects of connected-automated vehicle technologies on travel demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2625, 1–8.
- Auld, J., Verbas, O., Javanmardi, M., & Rousseau, A. (2018). Impact of privately-owned level 4 CAV technologies on travel demand and energy. *Procedia Computer Science*, 130, 914–919.
- Axhausen, K. W., & Gärling, T. (1992). Activity-based approaches to travel analysis: Conceptual frameworks, models, and research problems. *Transport Reviews*, 12(4), 323–341.
- Bangemann, C. (2017). Simulation einer urbanen Mobilitätslösung basierend auf autonom fahrenden E-Robotaxen in München. TU München: Berylls Strategy Advisors.
- Beiker, S. (2018). Deployment of automated driving as an example for the San Francisco Bay area. In G. Meyer & S. Beiker (Eds.), *Road vehicle automation 5* (pp. 117–129). Cham: Springer.
- Bertolini, L. (2012). Integrating mobility and urban development agendas: A manifesto. *Disp – The Planning Review*, 48(1), 16–26.
- Bertolini, L. (2017). *Planning the mobile metropolis. Transport for people, places and the planet*. London: Palgrave.
- Bischoff, J., & Maciejewski, M. (2016). Simulation of city-wide replacement of private cars with autonomous taxis in Berlin. *Procedia Computer Science*, 83, 237–244.
- BlaBlaCar. (2018). How chatty are you in the car? Retrieved from: <https://www.blablacar.com/blog/blablalife/travel-tips/chatty>
- Boesch, P., Ciari, F., & Axhausen, K. (2018). Transport policy optimization with AVs. Paper presented at the TRB annual meeting.
- Boesch, P. M., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2016). Autonomous vehicle fleet sizes required to serve different levels of demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2542, 111–119.
- Burghout, W., Rigole, P. J., & Andreasson, I. J. (2014). Impacts of shared autonomous taxis in a metropolitan area. Paper presented at the TRB annual meeting, Washington D.C.
- Burns, L. D., Jordan, W. C., & Scarborough, B. A. (2013). *Transforming personal mobility*. New York, NY: Earth Institute Columbia University.
- Chen, D., Hanna, J., & Kockelman, K. M. (2016). Operations of a shared, autonomous, electric 36 vehicle (SAEV) fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transport Research Part A*, 94, 243–254.
- Chen, D., & Kockelman, K. M. (2016). Management of a shared autonomous electric vehicle fleet. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2572, 37–46.

Childress, S., Nichols, B., Charlton, B., & Coe, S. (2015). Using an activity-based model to explore possible impacts Of automated vehicles. Paper presented at the TRB annual meeting.

Correia, G., Milakis, D., van Arem, B., & Hoogendoorn, R. (2015). Vehicle automation and transport system performance. In M. Bliemer, C. Mulley, & C. J. Moutou (Eds.), *Handbook on transport and urban planning in the developed world* (pp. 498–516). Cheltenham: Edward Elgar.

Correia, G., & van Arem, B. (2016). Solving the user optimum privately owned automated vehicles assignment problem (UO-POAVAP): A model to explore the impacts of self-driving vehicles on urban mobility. *Transportation Research Part B*, 87, 64–88.

Cyganski, R., Fraedrich, E., & Lenz, B. (2015). Travel-Time valuation for automated driving: A Use-case-driven study. Paper presented at the TRB annual meeting.

European Commission. (2016). *Gear 2030 discussion paper. Roadmap on highly automated vehicles*. Directorate-general for internal market, industry, entrepreneurship and SMEs.

Fagnant, D. J., & Kockelman, K. M. (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40, 1–13.

Fagnant, D. J., & Kockelman, K. M. (2016). Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation*. doi: Crossref

Fagnant, D., Kockelman, K. M., & Bansal, P. (2015). Operations of shared autonomous vehicle fleet for Austin, Texas, market. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2536, 98–106.

Friedrich, M., & Hartl, M. (2016). *Schlussbericht MEGAFON – Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs*. Stuttgart: University of Stuttgart, Institute for Road and Transport Science.

Gelauff, G., Ossokina, I., & Teulings, C. (2017). Spatial effects of automated driving: Dispersion, concentration or both. The Hague: KIM – Netherlands Institute for Transport Policy Analysis.

Gucwa, M. (2014). Mobility and energy impacts of automated cars. Analysis using MTC travel model One. Paper presented at the automated vehicle symposium.

Hansen, W. G. (1959). How accessibility shapes land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73–76.

Hawkins, J., & Habib, K. N. (2018). Integrated models of land use and transportation for the autonomous vehicle revolution. *Transport Reviews*.

Heilig, M., Hilgert, T., Mallig, N., Kagerbauer, M., & Vortisch, P. (2017). Potentials of autonomous vehicles in a changing private transportation system – a case study in the Stuttgart region. *Transportation Research Procedia*, 26, 13–21.

Hörl, S., Erath, A., & Axhausen, K. W. (2016). Simulation of autonomous taxis in a multi-modal traffic scenario with dynamic demand. Zurich: Institute for Transport Planning and Systems. ETH Zurich.

ITF (International Transport Forum). (2015). *Urban mobility system. Upgrade. How shared self-driving cars could change city traffic*. Corporate Partnership Board Report. OECD.

Jones, P. M., Dix, M. C., Clarke, M. I., & Heggie, I. G. (1983). *Understanding travel behaviour*. Aldershot: Gower.

Kasraian, D., Maat, K., Stead, D., & van Wee, B. (2016). Long-term impacts of transport infrastructure networks on land-use change: An international review of empirical studies. *Transport Reviews*, 36(6), 772–792.

Kim, K., Rousseau, G., Freedman, J., & Nicholson, J. (2015a). The travel impact of autonomous vehicles in metro Atlanta through activity-based modeling. Paper presented at the 15th TRB national transportation planning applications conference.

Kim, K. H., Yook, D. H., Ko, Y. S., & Kim, D. H. (2015b). An analysis of expected effects of the autonomous vehicles on transport and land use in Korea. Anyang: New York University, Marron Institute of Urban Management.

Kitamura, R. (1988). An evaluation of activity-based travel analysis. *Transportation*, 15, 9–34.

Kornhauser, A. L. (2013). Smart driving cars: Transit opportunity of NHTSA level 4 driverless vehicles. Paper presented at the TRB automated vehicle workshop.

Kröger, L., Kuhnimhof, T., & Trommer, S. (in press). Does context matter? A comparative study modelling autonomous vehicle impact on travel behaviour for Germany and the USA. *Transportation Research Part A*.

Levin, M. W., Kockelman, K. M., Boyles, S. D., & Li, T. (2017). A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 373–383.

Le Vine, S., Zolfaghari, A., & Polak, J. (2015). Autonomous cars: The tension between occupant experience and intersection capacity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52, 1–14.

Liu, J., Kockelman, K. M., Boesch, P. M., & Ciari, F. (2017). Tracking a system of shared autonomous vehicles across the Austin, Texas network using agent-based simulation. *Transportation*.

Llorca, C., Moreno, A. T., & Moeckel, R. (2017). Effects of shared autonomous vehicles on the level of service in the greater Munich metropolitan area. Paper presented at the international conference on intelligent transport systems in theory and practice, Mobil.TUM, Munich.

Martinez, L. M., & Viegas, J. M. (2017). Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6, 13–17.

Meyer, J., Becker, H., Boesch, P. M., & Axhausen, K. W. (2017). Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities? *Research in Transportation Economics*, 62, 80–91.

Milakis, D., van Arem, B., & van Wee, B. (2017). Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 21(4), 324–348.

Moreno, A. T. (2017, April 10–13). Autonomous vehicles: Implications on an integrated land-use and transport modelling suite. Paper presented at the 11th AESOP young academics conference in Munich.

SAE International. (2018). Surface vehicles recommended practice. J3016. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.

Spieser, K., Treleaven, K., Zhang, R., Frazzoli, E., Morton, D., & Pavone, M. (2014). Toward a systemic approach to the design and evaluation of automated mobility-on-demand systems: A case study in Singapore. In G. Meyer, & S. Beiker (Eds.), *Road vehicle automation. Lecture notes in mobility* (pp. 229–245). Cham: Springer.

Stocker, A., & Shaheen, S. (2017). Shared automated vehicles. A review of business models. International Transport Forum Discussion Paper 09/2017.

Thakur, P., Kinghorn, R., & Grace, R. (2016). Urban form and function in the autonomous era. Australasian transport research forum proceedings.

Wegener, M., & Fürst, F. (1999). Land-use transport interaction: State of the art. Deliverable D2a of the project TRANSLAND (integration of transport and land use planning). Dortmund: University of Dortmund.

Zhang, W. (2017). The interaction between land use and transportation in the era of shared autonomous vehicles: A simulation model (Dissertation). Georgia Institute of Technology

Zhang, W., & Guhathakurta, S. (2017). Parking spaces in the age of shared autonomous vehicles Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2651, 80–91. doi: Crossref

Zhang, W., Guhathakurta, S., & Fang, J. (2015). Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach. Sustainable Cities and Society, 19, 34–45.

Zhang, W., Guhathakurta, S., & Khalil, E. B. (2018). The impact of private autonomous vehicles on vehicle ownership and unoccupied VMT generation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 90, 156–165. doi: Crossref

Zhao, Y., & Kockelman, K. M. (2017). Anticipating the regional impacts of connected and automated vehicle travel in Austin, Texas. Paper presented at the TRB annual meeting.

5. Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge

Städte sind durch eine Vielfalt von verschiedenen Straßenräumen gekennzeichnet. Der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Straßenräumen und der Funktionsweise bzw. dem Einsatz automatisierter Fahrzeuge wurde in bisherigen Studien jedoch nur unzureichend beleuchtet.

Der folgende Artikel „**Automated drivability: Toward an assessment of the spatial deployment of level 4 automated vehicles**“, der 2020 in Transportation Research Part A: Policy and Practice (Impact Factor: 3.992 – 2019) veröffentlicht wurde, untersucht daher die Eignung unterschiedlicher Straßenräume für den Betrieb automatisierter Fahrzeuge aus technisch-infrastruktureller Sicht.

Der Artikel diskutiert zunächst allgemein den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Straßenräumen und Umfeldbedingungen und der Funktionsweise automatisierter Fahrsysteme. Davon abgeleitet wird ein Framework entwickelt und entsprechende Indikatoren aufgelistet, mit welchen die Eignung verschiedener Straßenräume für automatisierte Fahrzeuge abgebildet werden kann. Am Beispiel der Stadt Wien wird dieses Framework der Automated Drivability angewendet, entsprechende Indikatoren abgeleitet bzw. berechnet und letztlich zusammengefügt, sodass eine Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung für automatisierte Fahrzeuge für das gesamte Straßennetz in Wien vorgenommen wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass Städte grundsätzlich sehr unterschiedliche Bedingungen für automatisierte Fahrzeuge aufweisen und dass automatisierte Fahrzeuge nicht sofort im gesamten Stadtgebiet eingesetzt werden können. Während automatisierte Fahrzeuge insbesondere auf Autobahnen und in Gebieten am Stadtrand eher und dort auch ohne zusätzliche Maßnahmen eingesetzt werden könnten, sind innerstädtische Straßenräume, die gleichzeitig oftmals auch Aufenthaltsräume von FußgängerInnen und RadfahrerInnen oder Kindern darstellen, dagegen schlechter geeignet. Hier ist ein Einsatz automatisierter Fahrzeuge zumindest in naher Zukunft nicht in Sicht oder benötigt umfangreiche Begleitmaßnahmen, die die Komplexität der Einsatzumgebung (z.B. geringere Geschwindigkeit) reduzieren. Dies bedeutet letztlich auch, dass die Wirkungen automatisierter Fahrzeuge zunächst nur selektiv eintreten werden und dass der Einsatz bzw. der Betrieb von automatisierten Fahrzeugen in bestimmten Gebieten begleitende bzw. vorbereitende Maßnahmen erfordert, um letztlich die mit automatisierten Fahrzeugen verbundenen Chancen nutzen zu können.

5.1. Automated drivability: Toward an assessment of the spatial deployment of level 4 automated vehicles

Aggelos Soteropoulos^{a*}, Mathias Mitteregger^b, Martin Berger^c, and Jakob Zwirchmayr^d

^a Future.lab, Institute for Transportation System Planning, Technical University of Vienna, Vienna, Austria

^b Future.lab, Department for Architecture & Spatial Planning, Technical University of Vienna, Vienna, Austria

^c Institute for Transportation System Planning, Technical University of Vienna, Vienna, Austria

^d TTTech Auto, Vienna, Austria¹

* Corresponding author: Aggelos Soteropoulos, Institute for Transportation System Planning, Technical University of Vienna, Augasse 2-6, 1090 Vienna, Austria. E-Mail: aggelos.soteropoulos@tuwien.ac.at

Veröffentlicht 2020 in Transportation Research Part A, Vol. 136, S. 64-84.

¹ The opinions expressed herein are entirely those of the author and do not necessarily reflect the views of TTTech Auto.

Abstract

Two scenarios have shaped the discussion on the deployment of automated vehicles (AVs). The first is the revolutionary or disruptive scenario, in which a competitor would reach fully automated vehicles (level 5) in one giant leap. The second scenario renders the deployment of AVs as a lengthy process of evolutionary vehicle automation, progressing from specialized, controlled and restricted conditions, i.e. operational design domains (ODDs), to ever more complex ones. But as it becomes more and more clear that there are large uncertainties about how far in the future level 5 AVs become available, in the near future situations in which the driver is replaced completely, i.e. not requiring driver interventions, only seem feasible in specific ODDs and cities will likely be faced by highly automated vehicles (level 4) equipped with automated driving systems (ADSs) for specific ODDs over a longer period. However, cities comprise different street spaces with various conditions which lead to different requirements for the ADSs and could affect the deployment of level 4 AVs and thus the impacts of AVs in cities in the near future. This paper presents a framework and related indicators for assessing the automated drivability, i.e. the suitability of street spaces for the functioning operation of ADSs from a technical-infrastructure point of view, based on the relationship between the current technological development state of ADSs and different (urban) street spaces. Using the case study of the city of Vienna in Austria to apply the framework, a set of indicators for the different components of the framework is calculated and integrated to build an automated drivability index (ADX), illustrating the automated drivability within the street network. The results are a first step to indicate which areas are more suitable for level 4 AVs from a technological point of view, as well as areas where a deployment of AVs would only be possible after larger adjustments of the infrastructure or at considerably lower than intended speeds; thus, detailing the complexity of driving urban street spaces in a yet unprecedented level. Besides other aspects this can give hints for policy makers and other stakeholders where to facilitate the deployment of AVs.

5.1.1. Introduction

AVs have the potential to change mobility in the next years and decades. Whereas the public imagination is mostly captured by fully automated vehicles (level 5) that could drive themselves anywhere and under any conditions in which a normal human driver would be able to drive, in the near future situations where the driver is replaced completely, i.e. not requiring driver interventions, only seem feasible in specific ODDs, i.e. highly automated vehicles (level 4) that could drive themselves in specific ODDs (Beiker, 2018, Shladover, 2018a, Shladover, 2018b). In 2016, SAE International introduced the term “operational design domain” (ODD) to account for the conditions under which a given automated driving system (ADS) is designed to function. The term ODD covers specific geographic, roadway, environmental, traffic and temporal conditions (SAE International, 2016, SAE International, 2018). It includes static components like roadways, infrastructure or neighbourhoods as well as dynamic components like traffic volumes or weather. However, also static components can change because of road work, infrastructure decay or events like accidents and temporary road blockades etc. (Fraade-Blanar et al., 2018). Defined that way, a more complex ODD, with a large number of other road users for example, demands more sophisticated ADSs, capable of processing a large number of elements within short periods of time or the ability to deal with increased perceptual noise (Czarnecki, 2018). Progress in the development of ADSs (more powerful hardware components or software) might expand the ODDs of ADSs until they finally merge into one (level 5) (Fraade-Blanar et al., 2018). However, there are large uncertainties about how far in the future those will become available (Shladover, 2018a).

Looking at cities, they comprise various different street spaces, which differentiate regarding their structural and infrastructural facilities, their surrounding building stock and the presence of different road users. This suggests that there are many different street spaces with various conditions within these cities that lead to different requirements for the operation of ADSs from a technological point of view (Metz, 2018, Anguelov, 2019, Mitteregger et al., 2020).

Some literature has pointed out the relevance of different environment and physical infrastructure factors for a functioning ADS. Most studies are based on experts' opinions (e.g. Nitsche et al., 2014, Transport Systems Catapult, 2017, Farah et al., 2017, ITF - International Transport Forum, 2018) and emphasize that street spaces in complex urban environments, poor visibility (obstruction), poor quality of lane markings as well as traffic signals (and signs) or work zones pose challenges for ADSs and thus demand higher requirements for their functionality.

Studies based on empirical information in this context are scarce. However, as some authorities in the USA and Europe, i.e. the Department of Motor Vehicles of the State of California or the Austrian Ministry for Transport, Innovation and Technology, require manufacturers testing their AVs to publicly report on their testing in general and on disengagements, i.e. occasions when an ADS disengages within tests and the human operator is required to take-over (Lv et al., 2018), in particular, some empirical data supporting the relevance of different environments and infrastructure factors can be found within these reports (ITF, 2018). Favarò et al. (2018) made the largest investigation of disengagement reports of the years 2015 and 2016 in the state of California and analysed the reasons for overall 2,616 disengagements. They found that besides discomfort of the driver (27%), system failures due

to incorrect perception of external objects or of the traffic behaviour of other road users (6%) as well as traffic light detection (4%) are main reasons for disengagements. Moreover, external conditions like poorly marked lanes (5%), construction zones (2%) or heavy pedestrian traffic (2%) often were reasons for disengagements. Similarly, Fetka (2018) investigated the disengagement reports of the year 2017 in the state of California and reports that 43% of the disengagements were due to factors linked to the traffic environment like complex traffic situations or unexpected behaviour of other road users. Moreover, 12% of the causes for disengagements were infrastructure-related, e.g. due to bad visibility of guiding systems, unexpected obstacles or construction sites.

Besides analyses of disengagements also studies focussing on the current state of road and on-road object detection and sensors used by ADSs stress this relevance. Braun et al. (2018) for example found that object detection especially of vulnerable road users (pedestrians, bicyclists) in non-standard poses, in rainy or night-time conditions or under partial occlusions represent challenges.

In this context, also the existence of digital infrastructure within street spaces that enables connectivity between the AV and other vehicles (vehicle to vehicle), other road users (e.g. vehicle to pedestrian) or infrastructural components (vehicle to infrastructure) and vice versa (infrastructure to vehicle) could potentially play an important role, providing additional information to understand the environment and calculate the navigation of the AV, i.e. improvement of the perception and planning tasks (Pendleton et al., 2017, Shladover, 2018a). This is also true for up-to-date digital maps (HD Maps) or information services that could inform vehicles about dynamic and changing elements like the road condition or construction sites (Van Brummelen et al., 2018). However, apart from test sites for AVs, such digital infrastructure has yet not made its way into cities (Carreras et al., 2018).

Overall, certain street spaces and their conditions seem to increase the requirements for current ADSs. From a technological point of view this has impacts where level 4 AVs can drive safely in automated mode (ODD specific) and might therefore also affect the possible deployment of level 4 AVs as well as possible necessary infrastructure adjustments (e.g. specific designated traffic lanes or equipment with digital infrastructure (e.g. infrastructure to vehicle) to simplify the conditions of the ODD) for deploying level 4 AVs in cities and thus their impacts in cities in the near future. However, these aspects are rarely discussed so far when looking at possible transport and spatial impacts of AVs with studies mostly investigating the impacts of AVs that could operate in all contexts of the city (region) (Soteropoulos et al., 2019) or only discussed to some extent (Madadi et al., 2018).

This paper therefore presents a framework for assessing the automated drivability, i.e. the suitability of street spaces for the functioning operation of ADSs from a technical-infrastructure point of view based on the relationship between the current technological development state of ADSs on the one side and different (urban) street spaces on the other side. Based on the components of the framework incorporating the challenges for ADSs, indicators and sources of data that could represent the suitability of street spaces for ADSs, i.e. the level of challenge or complexity to ADSs in different parts of the street network, are explored. Using the case study of the city of Vienna in Austria to apply the framework, a set of indicators for the components of the framework is calculated and integrated to build an automated drivability

index (ADX) illustrating the suitability of different parts of the street network for ADSs in Vienna. Moreover, a critical consideration of the trade-offs required by the limitations of data availability with regard to the possible indicators is made. Although also empirical approaches to assess the suitability of street spaces for the functioning operation of ADSs like driving an AV in a potential area of deployment and identify, calculate and map disengagements or perception failures – like Ramanagopal et al. (2018) have done for a specific route in Oxford – seem feasible, such approaches usually pose challenges regarding the legal framework in most cities in Europe. In addition, driving along all streets in a city needs a lot of time and financial resources. The presented framework and the related indicators therefore are first steps of how an assessment of the suitability of different parts of the street network could be made and how the identification of initial potential areas for ODDs for ADSs could be tackled without such rather time and cost consuming processes. To the best of our knowledge this has not been done before.

The paper is structured as follows. Chapter 2 first describes the operating principle of current ADSs and summarises their challenges based on their technological components. Chapter 3 characterises different urban street spaces. Based on that, in chapter 4 the framework for the assessment of automated drivability is presented and indicators for the components as well as sources of data that could represent the level of challenge to ADSs in different parts of the network are explored. In chapter 5, using the case study of the city of Vienna, a set of indicators for the components of the framework are calculated and combined to build the integrated ADX. The paper closes with a discussion, also considering the trade-offs by the limitation of data availability with regard to the indicators representing the challenges for ADS as well as a conclusion and recommendations for further research in chapter 6.

5.1.2. Automated driving systems

The first starting point for the development of the framework of the automated drivability was a detailed investigation of the operation principle of automated driving systems. In general, essential components of ADSs are sensors and actuators (hardware) as well as software modules (Thrun, 2010). For a typical ADS the dynamic driving task is structured in three central tasks: (1) perception, (2) planning and (3) control (Fig. 1) (Thrun et al., 2006, Campbell et al., 2010, Pendleton et al., 2017). ADSs have to measure the environment with sensors, have to understand the environment based on these sensor data (perception), have to come to a driving decision based on this comprehension over and over again (planning) and have to execute the planned decisions with the necessary inputs for the hardware vehicle system (control) (Ritz, 2018, Pendleton et al., 2017, SAE International, 2018). Thus, the navigation process of an ADS is a high frequency recursive process (van Brummelen et al. 2018).

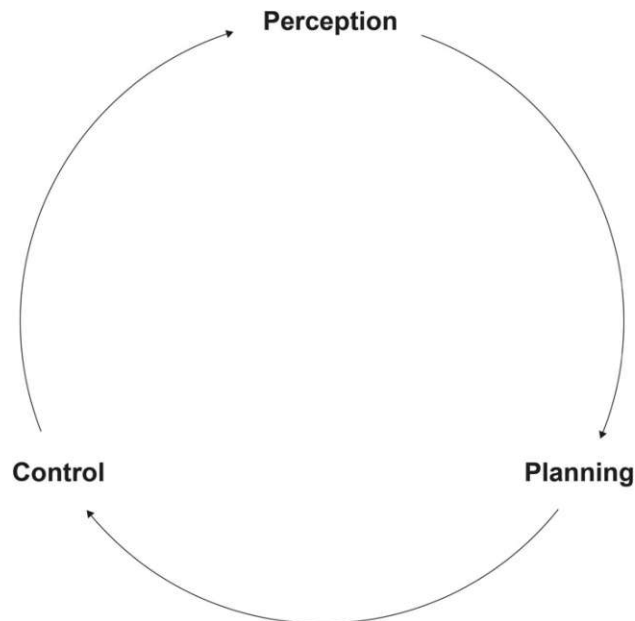


Fig. 1. Operating principle of ADSs (adapted from Pendleton et al., 2017, Campbell et al., 2010, Thrun et al., 2006).

5.1.2.1. Perception

Perception incorporates the monitoring of the driving environment via object and event detection, recognition, classification and response preparation (SAE International, 2018). It is the ability of an ADS to collect information and extract relevant knowledge from the environment (Pendleton et al., 2017). This is done using sensors that measure and monitor (1) the own state and position (localization), i.e. the position of the AV with respect to the environment and ADS performance, and (2) the driving environment, i.e. roadway environmental object and event detection (environmental perception), e.g. information on free drivable areas, surrounding obstacles' locations or velocities in real time (Pendleton et al., 2017, Van Brummelen et al., 2018, SAE International, 2018). Sensors in ADSs include radar sensors (radio detection and ranging), ultrasonic sensors, camera-based systems, infrared sensors, geographic position systems (GPS) and inertial navigation systems (INS) as well as lidar sensors (light detection and ranging) (Bagloee et al., 2016). By using neuronal networks, deep learning algorithms interpret the millions of data and images of the sensors and cameras and categorize data by their semantic meaning (Pendleton et al., 2017). This includes the image and sensor data processing, the fusion of multiple sensors, the mutual check of plausibility as well as the understanding of the scene (snapshot of the environment), including the detection of the context of the scene and the relations between the objects, the combination from semantic pre-knowledge, the detection of intentions, the forecast of the expected driving behaviour and the preparation of the reaction (Wahlster, 2017, Ulbrich et al., 2015).

5.1.2.2. Planning

Planning is the process of creating a purposeful and appropriate response to detected objects and events as well as higher order goals (i.e. getting to a certain location while avoiding obstacles) and the calculation of a safe and comfortable trajectory. It involves (1) mission planning, i.e. fulfilling high level objectives like bringing the vehicle from a start location to a goal location or optimizing the route, (2) behavioural planning, which includes the appropriate interaction with other actors and thus establishes local goals (change of lanes, reduction of

speed) that then are followed by (3) motion planning, i.e. generating appropriate paths that follow high level objectives and local goals (overtaking a vehicle and avoid collision) (Paden et al., 2016, Wahlster, 2017, SAE International, 2018). Thus, planning refers to the process of making purposeful decisions (decision-making component) in order to achieve the robot's higher order goals (Pendleton et al., 2017, Van Brummelen et al., 2018).

5.1.2.3. Control

Control refers to the ability of the ADS to execute the planned actions with regard to the lateral (y-axis) and longitudinal (x-axis) vehicle motion control, using the hardware of the vehicle system (Pendleton et al., 2017, SAE International, 2018). This is implemented by actuators translating the electrical signals into mechanical motion, that is, changes in intrinsic behaviour and in the environment (Campbell et al., 2010, Wahlster, 2017) and calculating the appropriate vehicle command (torque, acceleration, angle etc.) in order to follow the optimal route decision (van Brummelen et al., 2018).

The first two tasks are particularly important as they refer to locating the ADS in a meaningful environment and generating purposeful actions, i.e. proper handling of external situations that the vehicle encounters including perception, planning, and implementation of own-vehicle actions, also known as Object and Event Detection and Response (OEDR) (Koopman and Fratrick, 2019, SAE International, 2018). Thus, both perception and planning are immediately linked to a specific ODD and of crucial importance for the capabilities of level 4 AVs. Control refers more to the internal process of the ADS, communicating with breaks, engine or lights of the vehicle system and is thus only indirectly linked to the ODD via weight, size or occupancy of the vehicle (Wachenfeld et al., 2016). The main challenge for the ADS is the fusion of many and different data from multiple sensors to one image of the environment, i.e. scene representation (Thrun, 2010). Based on these data samples, the software has to recognize all relevant objects within the vehicle path and predict future motions of mobile objects (e.g. vehicles, pedestrians, bicyclists etc.). For the respecting ODD, this must at least match perception capabilities of experienced human drivers (Shladover, 2018b). Performing these tasks is of different complexity with regard to the variability of objects (e.g. types, appearance, pose), environments (roadway, times of day, seasons) and scene configurations/object relationships (occlusions, reflections, interactions) (Anguelov, 2019). This variability of different types of objects, different roadway environments or different scene configurations is reflected in the different appearance of street spaces and their condition, which seem to play a critical role.

5.1.3. Urban street spaces

The other starting point for the development of the framework of the automated drivability was an investigation of the diverse street spaces and their characteristics that typically can be observed in cities. Based on existing literature, especially existing design manuals in several countries in Europe (e.g. FSV - Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, 2001, FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2006), in principle, to differentiate urban street spaces (1) traffic features, (2) urban characteristics and (3) road characteristics can be used.

Traffic features include (a) the function of the street, i.e. link function or access function, and (b) the traffic volume (of all types of traffic), i.e. traffic intensities and temporal distribution or demand in stationary/parked traffic (FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2006, Department for Transport, 2007, Marshall, 2005).

Urban characteristics include (a) the character of the area, e.g. middle-aged city centre or modern housing estate on the outskirts and (b) the type and extent of the surrounding uses and the occupancy function, e.g. the nature and extent of building and land usage along the street, i.e. civic, commercial, residential, industrial, as well as boundaries (e.g. enclosed peripheral or open building development) or the width between façade and façade. This also comprises buildings (e.g. layout, design, corners), adjoining open spaces, vernacular elements (e.g. front gardens), and distinctive green elements (FGSV, 2006).

Road characteristics refer to the specific street space situation, i.e. width between curb and curb as well as alignment (e.g. widenings or narrowings, t-junctions, intersections) of the street space, street cross sections, squares and square-like widenings of streets as well as materials and surface designs typical for the location (e.g. asphalt, concrete) (FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2006, Marshall, 2005).

As a result, different types of streets such as living streets, collector roads, shopping streets or urban motorways etc. can ultimately be distinguished in a city (FGSV, 2006). Also, the different types of intersections as connecting points between streets are dependent on the traffic features as well as the urban and road characteristics, in particular on the network function of the streets being linked, their traffic volumes, their accident statistics as well as the traffic engineering requirements and the street space available where the intersection is to be laid out. Depending on the characteristics of the respective streets to be connected, right of way, traffic sign control, traffic light control or a roundabout are of different suitability (FGSV, 2006).

Based on these different characteristics, urban street spaces are associated with a different variability of objects, environments and scene configurations/object relationships and lastly present a different complexity for the tasks of ADSs.

5.1.4. The framework for the assessment of automated drivability: components, challenges for ADSs and possible indicators

The framework for the assessment of automated drivability is developed based on the combination of the challenges of ADSs with respect to their current technological state as well as the consideration of different street space contexts and demonstrates the relationship between technology on the one hand and urban street space contexts on the other hand. In the literature, such frameworks are found mainly for pedestrian and bicycle traffic to guide the selection and structuring of walkability and bikeability indicators and lastly combining them to build a walkability or bikeability index (Kelly et al., 2011, Winters et al., 2013, Moura et al., 2017, Su et al., 2019): for each component of the framework different indicators are calculated for a given reference space (grid cells or street segments) and then combined into a total value (index) that reflects the suitability for walking or cycling (Buck and Tkaczick, 2014).

Analogous to these indices and as described above, certain elements of street spaces and their condition also seem to be of importance with regard to a functioning operation of ADSs, leading to a different complexity of their respective ODD: street spaces can vary regarding geographic, roadway, environmental, traffic and temporal elements and conditions, of which some represent challenges and thus, a higher complexity for the functioning use of ADS (Thorn et al., 2018). Building on these numerous possible elements that were already partly described in the previous chapters, different components related to the suitability of street spaces for the functioning use of ADSs and reflecting a different complexity of ODDs have been derived that constitute the indicator framework for assessing the automated drivability.

5.1.4.1. Framework components and challenges for ADS

The framework for the assessment of the automated drivability comprises five components, including the (1) number of objects within the street space, (2) diversity of objects within the street space, (3) condition and configuration of the road infrastructure, (4) speed limit and (5) stability of the ODD.

Fig. 2 gives an overview of the five components and sub-elements of the framework with regard to the central tasks of ADS as well as their mechanisms on increasing complexity for these tasks: to perform the dynamic driving task the ADS has to detect objects, identify and determine behaviours of objects and respond to them. Especially dynamic objects are complex for ADSs as besides their detection and identification, the ADS also needs to determine and predict their future behaviour. Moreover, obstacles can increase the complexity as they hinder the detection and identification of objects. In this regard, the complexity is especially increased if there is a high number and high diversity of (a) objects that have to be detected and whose behaviour has to be determined (e.g. pedestrians, cyclists) and (b) obstacles that hinder the detection and identification of objects. In addition, the condition (e.g. bad condition/non-existence of signage) and configuration (e.g. intersection, small lane width) of the road infrastructure could further increase the complexity for the ADS. This also applies to higher speeds, as the detection, identification and determination of future behaviour of objects and the appropriate response of the ADS has to be done faster. Lastly, a low stability of the ODD, including varying traffic conditions and events (normal/rush hour traffic, construction zones, emergency vehicles, accidents) and environmental conditions (snow, rain, particulate matter like fog or lighting conditions/illumination, e.g. night, sun glare) further increases the complexity for ADSs, as the ADS has to work properly in all these conditions, although especially extreme weather conditions limit the functionality of the cameras and sensors.

5.1.4.1.1. Number of objects within the street space

The number of objects within the street space describes the presence of different objects within the street space. On the one hand, it can be distinguished between dynamic objects (e.g. different road users, animals) and static objects (e.g. traffic signs, traffic signal lights, road markings). Here especially dynamic objects are problematic as besides their detection and identification (e.g. classification) the ADS has to determine and anticipate their future behaviour. The behaviour of objects can be further differentiated into (a) normal or reasonably expected behaviours or movements (e.g. pedestrian crossing the street at green traffic lights or at pedestrian crossings) and (b) unexpected, incorrect or exceptional behaviours (e.g. pedestrian crossing the street at red traffic lights or jaywalking) where especially the latter further increases complexity (Koopman & Fratrick 2019). Of course, complexity for the ADS

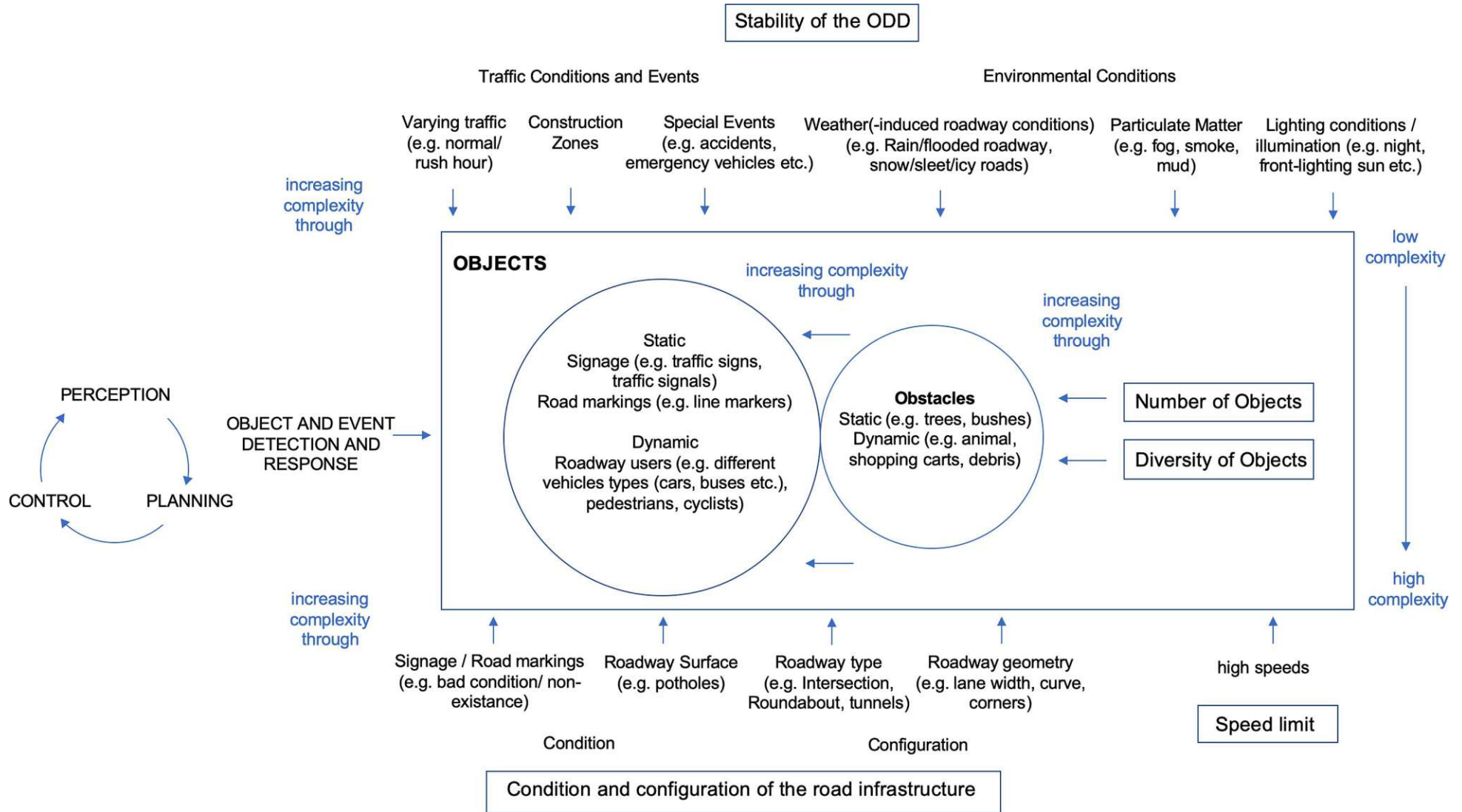


Fig. 2. Central tasks of ADS and the components of the framework for the assessment of automated drivability plus sub-elements (with associated examples).

increases the more of such objects have to be detected, identified and whose behaviour has to be determined: For example, the presence of a large number of pedestrians was a common cause of problems and incidents when testing AVs (Favarò, et al., 2018, Campbell et al., 2010). On the other hand, also a distinction can be made between objects that have to be observed and objects that might block the view: whereas other road users or traffic signal lights have to be observed from the ADS, obstacles in the street space, such as trees, bushes, parked cars, street lights, overhanging signage, billboards or debris etc. might represent barriers (physical obstructions) to the perception task of ADSs (ITF - International Transport Forum, 2018, Koopman and Fratrik, 2019). Also here, complexity is especially increased the higher the number of obstructional objects that hinder the detection and identification of objects.

5.1.4.1.2. Diversity of objects within the street space

The diversity of objects within the street space refers to the heterogeneity of objects that have to be detected and identified by the ADS and whose behaviour has to be determined. This comprises different static objects such as traffic signs, road markings or traffic light signalling systems (e.g. crossing gates), but also different dynamic objects, especially road users such as pedestrians, cyclists, motorcyclists, trams, human-driven motor vehicles (e.g. cars, heavy goods vehicles, busses) and other AVs, or animals. The higher the diversity of objects that have to be detected and identified by the ADS, the more knowledge and proven solutions for the development of software for an ADS is required: Whereas cyclists can only rarely be expected on motorways and thus here ADSs usually don't need to be capable of anticipating their behaviour, at intersections with bike lanes for example cyclists are likely and therefore more sophisticated ADS are needed that are capable of determining the (often unpredictable) behaviour of cyclists (Bugala, 2018, Czarnecki, 2018; Thorn et al., 2018). Here, in particular the diversity of objects on the roadway, i.e. objects present on the roadway or possibly interacting with the ADS, is relevant, e.g. cyclists riding directly on the street (e.g. on a cycle or multi-purpose lane) or trams operating on tracks implemented on the roadway. In addition, there are very different traffic signs (e.g. stop, yield, school zone), traffic signals (e.g. flashing, school zone) and road markings that can also vary within different regions of a country (e.g. blue stop signs, green bike lanes etc.) and further increase the complexity for the ADS as it needs to be capable to identify all these signage (Thorn et al., 2018, Koopman and Fratrik, 2019).

5.1.4.1.3. Condition and configuration of the road infrastructure

The condition and configuration of the road infrastructure refers to the existence and condition or quality of road infrastructure, i.e. signage, road markings and roadway surface, as well as their configuration, in particular the configuration of the roadway (the part of the road on which vehicles drive), i.e. roadway type like intersection, weaving area, roundabout, tunnel, underpass and roadway geometry like lane width or curve and separation of modes etc.

Regarding the condition of the road infrastructure the detection and identification of road markings in bad condition, missing reflector posts or potholes, and different colour values, for example by patching or in comparison of asphalt and concrete (road condition), etc. pose problems for the sensors as well as for the software of ADSs (Fellendorf, 2018, Alkim, 2010, EuroRAP, 2018). For example, Lv et al. (2018) report that road surface conditions (including poor markings) were one of the main causes of disengagements during AV tests in the United States (Lv et al., 2018).

Regarding the configuration of the road infrastructure especially (unsignalized) intersections, weaving areas or roundabouts pose challenges and increase the complexity for ADSs as the behaviour of the vehicle is dependent on the various possible actions of the surrounding road users and vice versa, potentially increasing with the number of arms of the intersection (Radwan et al., 2017, Transport Systems Catapult, 2017). In fact, Favarò et al. (2017) analysed accidents of AVs in California between 2014 and 2017 and indicate that most of these accidents happened at intersections, although in nearly all of the accidents the other vehicle manoeuvre contributed to the accident. This is also indicated by Boggs et al. (2020) which included accidents that happened in 2018 as well. Moreover, tunnels and underpasses pose challenges and increase the complexity for ADSs as GPS positioning signals can be blocked or because of a high illumination when entering or exiting the tunnel or underpass (Dempsey, 2019, Rosique et al., 2019). Regarding the roadway geometry especially small roadway widths or corners increase the complexity for ADSs as the field of vision for the sensors monitoring the environment is smaller (limited sight distances) and the identification of objects in the environment tends to be worse – although because of the smaller view less objects might need to be detected (Campbell et al., 2010, Prakken, 2017).

5.1.4.1.4. Speed limit

Different speeds are of vital importance for the functioning use of AVs. Higher operating speeds mean less reaction time for the ADS, i.e. the time for (a) the detection of the environment by the sensors, (b) the processing of the sensor data by the software, (c) the achievement of a control decision, (d) the command to the actuators, (e) the reaction of the actuators and (f) the reaction of the vehicle itself (Campbell et al., 2010). Higher speeds and thus less reaction time increase the complexity for ADSs as a much faster computational time of the system and higher computational resources are needed (Pendleton et al., 2017, Czarnecki, 2018). Moreover, as the sensors of ADSs typically have a specific distance range, at high operating speeds these ranges are lower in terms of time, compared to lower operating speeds (van Brummelen et al., 2018).

5.1.4.1.5. Stability of the ODD

The stability of the ODD describes the constancy of the respective conditions of the ODD. Here changing traffic conditions and events as well as environmental conditions can be distinguished. Regarding traffic conditions, varying traffic conditions throughout the day (e.g. normal or rush hour traffic), construction works (with changes to road markings and signs as well as new objects like cones) as well as special events (e.g. accidents, emergency vehicles, hand signals by the police etc.) pose challenges for ADSs: the ADS has to be capable of detecting and identifying the different set of visual and audible cues that might conflict with existing traffic signs and road markings (Nowakowski et al., 2015, Thorn et al., 2018, Kopko, 2019). Environmental conditions include weather(-induced roadway) conditions like rain or flooded roadways, snow, sleet or icy roads, particulate matter like fog, smoke or mud, or specific lighting conditions/illumination (e.g. night, dusk, sun glare etc.) that increase the complexity for the operation of ADSs as they make the detection and identification of objects more difficult (e.g. not detectable road markings because of snow), limit the visibility as well as the functionality and fidelity of the cameras and sensors, i.e. reduction of maximum range and signal quality (Johnson, 2017, ITF - International Transport Forum, 2018, Thorn et al., 2018, Shoettle, 2017).

5.1.4.2. *Indicators for representing the framework components and challenges for ADSs*

To represent the different components of the framework and their sub-elements, i.e. the challenges for ADSs, different indicators and sources of data can be used. Indicators are used in several fields and can be viewed as variables which are an operational representation of a specific attribute (Birkmann, 2006). They allow assessments to be made using limited, representative information (Burton, 2002). Indicators must be as specific as possible with respect to a particular issue; they should also be scientifically credible, unbiased and representative of the condition concerned. However, in order to be applicable, indicators should be based on information that is either readily available or relatively easy and inexpensive to collect (von Schirnding, 2002).

Table 1 gives an overview of the components of the framework and the different challenges for ADS as well as possible indicators and their data sources that could represent these challenges. Any such list is unlikely to be complete, however, it is a starting point to explore how to represent the different challenges for ADSs.

Overall both direct and indirect indicators representing the different sub-elements and challenges can be distinguished. Direct indicators represent the actual information whether the respective challenges exist, i.e. existence (and condition) of a static object e.g. a stop sign at an intersection, real-time information on weather conditions (e.g. heavy rain) or on the presence or number of cyclists on the roadway (and their behaviour). However, data for these indicators is often unavailable or associated with high costs, i.e. financial and time resources. Indirect indicators represent the respective challenge only indirectly, i.e. for example the presence of non-structural separated bicycle infrastructure on the road(way) or traffic signs indicating cyclists only indirectly imply the presence of cyclists on the roadway and thus possible interactions between cyclists and ADSs. These indicators are not so reliable for representing the respective challenges and can represent those only approximately, as for example at roadways with non-separated bicycle infrastructure bicyclists not necessarily exist all day or at all weather conditions. However, data for indirect indicators is more often adequately available.

Especially with regard to challenges for ADSs that refer to the number and diversity of static objects that have to be observed (e.g. traffic signs, traffic lights, road markings) and static obstacles (e.g. trees, bushes, bins etc.) as well as the configuration of the road infrastructure (e.g. type of intersections, tunnels, narrow roads) and the speed limit, data for indicators directly representing those challenges is mostly fairly available: Often such data is available from the road operator (city, state, private etc.), HD maps or Open Street Map with relatively low efforts. In addition, data from street view services (photographs of street spaces) and image recognition of objects can be used, but would need more efforts. Moreover, whereas especially road operators regularly update these data, images of street view services represent single observations somewhere in the past and are only irregularly updated.

For challenges referring to the number and diversity of dynamic objects to observe (e.g. different road users) and obstacles (e.g. animals) as well as the condition of the road infrastructure (e.g. condition of road markings), and traffic and environmental conditions (e.g. surface conditions like icing) mostly real-time information is needed to assess the specific challenge in a detailed manner. Whereas real-time information for some of these challenge

Table 1. Overview indicators for representing framework components and challenges for ADSs.

Challenges	Indicators	Indicator type	Source of data	General Assessment of data availability	
Number/ diversity of objects					
Static: High number and different traffic signs/traffic lights/road markings	Number/diversity of specific traffic signs (e.g. stop, yield, railroad, school zone, etc.)	Direct	Road operator (city, state, private, etc.), HD Maps, Open Street Map, street view services (e.g. Google Street View, Mapillary, OpenStreetCam, etc.)	Fair	
	Number/diversity of specific traffic lights (e.g. flashing lights at school zone/crosswalks)	Direct	Road operator (city, state, private, etc.), HD Maps, Open Street Map, street view services	Fair	
	Number/diversity of specific road markings (e.g. crosswalks)	Direct	Road operator (city, state, private, etc.), HD Maps, Open Street Map, street view services	Fair	
	Number/diversity of specific road users on roadway (e.g. pedestrians, cyclists, motorcyclists, cars, busses, trams, etc.)	Direct	Real time information (e.g. video cameras) (direct)	Bad	
	Expected (maximum) number/diversity of specific road users on roadway (e.g. pedestrians, cyclists, motorcyclists, cars, busses, trams, etc.) at specific times (e.g. time of the day, day of the week, time of the year, i.e. seasonality)	ndirect	Traffic counts, Traffic models, crowdsourced data (e.g. Strava)	Bad	
	Access of pedestrian and cyclists to roadway (e.g. motorway, expressway)	ndirect	Road operator (city, state, private, etc.), HD Maps, Open Street Map	Good	
	Roadway type/functional road class (e.g. higher number of vehicles with a higher functional road class)	ndirect	Road operator (city, state, private, etc.), HD Maps, Open Street Map	Good	
	Number of traffic lanes (e.g. higher number of vehicles with more traffic lanes)	ndirect	Road operator (city, state, private, etc.), HD Maps, Open Street Map	Fair	
	Dynamic: High number and different roadway users (especially pedestrians and cyclists, etc.), animals, etc.	Number/diversity of public transit stations (e.g. public transit vehicles, pedestrians present)	ndirect	Road operator (city, state, private, etc.), Local Public Transit Authority, HD Maps, Open Street Map	Good
		Presence of Pedestrian Areas/Encounter Zones (e.g. pedestrians and cyclists present)	ndirect	Road operator (city, state, private, etc.), HD Maps, Open Street Map	Fair
Presence of cycling infrastructure on roadway (e.g. cyclists present)		ndirect	Road operator (city, state, private, etc.), HD Maps, Open Street Map	Fair	
Presence of bus route (e.g. busses present)		ndirect	Road operator (city, state, private, etc.), Local Public Transit Authority, HD Maps, Open Street Map	Fair	
Presence of tram tracks on roadway (e.g. trams present)		ndirect	Road operator (city, state, private, etc.), Local Public Transit Authority, HD Maps, Open Street Map	Fair	
Presence of traffic signs indicating pedestrians, children, cyclists, farm vehicles, etc.		ndirect	Road operator (city, state, private, etc.), HD Maps, Open Street Map	Fair	
Presence/number/diversity of specific animals on roadway		Direct	Real time information (e.g. cameras of road operator, traffic management info due to information of other road users)	Bad	
Observation					

Challenges	Indicators	Indicator type	Source of data	General Assessment of data availability	
Obstacles	Presence traffic signs indicating animals (e.g. deers, cow etc.)	ndirect	Road operator (city, state, private etc.) HD Maps, Open Street Map	Fair	
	Static: Trees, bushes, structures, curbs, median dividers, guard rails, billboards, ditches, berms, bins, street lamps etc.	Number/Diversity of static obstacles at roadway: e.g. trees, bushes, bins, street lamps etc.	Direct	Road operator, Local City, HD Maps, Open Street Map, street view services	Fair
	Dynamic: Animals, Shopping carts, debris	Presence/Number/Diversity of dynamic obstacles at roadway: e.g. animals, shopping carts, debris	Direct	Real time information (e.g. cameras of road operator, traffic management info due to information of other road users)	Bad
		Presence of traffic signs indicating grit, debris or falling rocks etc.	ndirect	Road operator (city, state, private etc.) HD Maps, Open Street Map	Fair
Condition and configuration of the road infrastructure					
Condition	Bad condition/non-existence of signage/road markings	Real time condition of signage/road markings (e.g. poorly marked lanes)	Direct	Road operator (e.g. cameras) (direct), street view services (indirect)	Bad
	Bad condition of roadway surface: potholes, different road surfaces	Presence/number of potholes at roadway	Direct	Road operator (e.g. cameras) (direct), street view services (indirect), information of other road users	Bad
		Road(way) age/recent renewals of road(way)	ndirect	Road operator (city, state, private etc.)	Bad
		Frequency of different types of road surfaces	Direct	Local city/state, HD maps, street view services	Fair
Configuration	Roadway type: intersection, Roundabout, Tunnel	Type of intersection (signalized, unsignalized, U turns, roundabout, railroad crossing etc.)	Direct	Road operator (city, state, private etc.) HD Maps, Open Street Map	Good
		Presence/number of tunnels or underpasses	Direct	Road operator (city, state, private etc.) HD Maps, Open Street Map	Good
		Width of roadway	Direct	Road operator (city, state, private etc.) HD Maps, Open Street Map	Fair
		Existence of corners	Direct	street view services	Fair
Speed limit	Roadway geometry: narrow road with corners	Presence of traffic signs indicating hidden intersection	ndirect	Road operator (city, state, private etc.) HD Maps, Open Street Map	Fair
		Dominant age of area (e.g. areas built in the 1960-1980s with more overseeable street spaces, much more adapted to the car and clearer separation between different types of road users)	ndirect	Local City	Fair
		Dominant Land Use type of area (e.g. industrial areas with more overseeable street spaces, much more adapted to the car and clearer separation between different types of road users)	ndirect	Local City, Open Street Map, COR, NE Land Cover	Good
	High Speeds	(average) Operating speed	Direct	Real time information (e.g. road operator (city, state, private etc.), Google Traffic AP, TomTom etc.) (direct), measurements, traffic model (indirect)	Bad
	Maximum Speed Limit	Direct	Road operator (city, state, private etc.) HD Maps, Open Street Map	Good	

Challenges	Indicators	Indicator type	Source of data	General Assessment of data availability	
Stability of the ODD					
Traffic Conditions	Varying traffic (e.g. normal/rush hour)	Variation of congestion on roadway throughout the day	Direct	Real time information (e.g. road operator (city state private etc.) Google Traffic AP TomTom etc. (direct); Traffic counts traffic models historical variation in Google Traffic AP (indirect))	Fair
	Construction zones	Presence of construction zone (or road blockade etc.)	Direct	Real time information Road operator (city state private etc.) HD Maps Navigation services traffic management info	Fair
	Special events: emergency vehicles accidents	Presence of emergency vehicles	Direct	Real time information police ambulance fire department	Bad
		Presence of emergency evacuation route	Indirect	Ambulance Fire department	Fair
	Weather(induced roadway conditions): rain/flooded roadway snow/sleet/icy roads	Presence of traffic signs indicating emergency vehicles	Indirect	Road operator (city state private etc.) HD Maps Open Street Map	Fair
		Presence of accidents	Direct	Real time information (e.g. road operator traffic management info due to information of other road users)	Bad
		Number of accidents in the last 3-5 years	Indirect	Accident Statistics	Bad
		Presence of police officers giving hand signals to regulate traffic	Direct	Real time information police	Bad
	Environmental conditions	Roadway condition (surface condition e.g. icing etc.)	Direct	Real time information (e.g. sensor cameras of road operator) weather stations	Bad
		Fog/smoke/mud	Presence of traffic signs indicating possible flooding or icy conditions	Indirect	Road operator (city state private etc.) HD Maps Open Street Map
Information on climate (e.g. average number of days with rain/snow at the roadway)			Indirect	Climate institutions	Bad
Lighting conditions/illumination (e.g. night dawn dusk front lighting sun)		Roadway condition (surface condition e.g. mud etc.)	Direct	Real time information (e.g. sensor cameras of road operator) weather stations traffic management info)	Bad
		Presence of traffic signs indicating fog area dust storms etc	Indirect	Road operator (city state private etc.) HD Maps Open Street Map	Fair
		Lighting condition	Direct	Real time information (e.g. sensor cameras of road operator) weather stations	Bad
Lighting conditions/illumination (e.g. night dawn dusk front lighting sun)	Presence of street lights	Indirect	Road operator (city state private etc.) HD Maps	Fair	
	Presence of traffic signs indicating sun glare/low sun	Indirect	Road operator (city state private etc.) HD Maps	Fair	

(e.g. information on construction zones) is mostly fairly available from the road operator or Google Traffic API etc., especially with regard to the presence of dynamic objects (e.g. different road users) these data is often unavailable, only available at streets equipped with cameras and sensors or associated with high costs, i.e. financial and time resources. To overcome this issue, also different (indirect) indicators representing these challenges based on fairly available data can be used: Instead of using real-time information on the presence of different road users, traffic signs or road categories (e.g. motorways) that are fairly available from the road operators or HD maps as well as data from traffic models or traffic counts that sometimes are available can be used that imply the presence or number of specific road users (e.g. pedestrians) at this part of the street network. Especially from traffic counts and crowd sourced data and (partly also) from traffic models, the expected number of specific road users (e.g. cars, pedestrians or cyclists etc.) within a time frame and at specific times, i.e. time of the day, with a differentiation regarding lighting conditions (e.g. daylight, dusk, dawn, night etc.) and time of the year (seasonality), with a differentiation regarding weather/climate conditions could be derived. However, such indicators can only approximately represent the respective challenges. Thus, especially for the challenges representing dynamic objects and the condition of the road infrastructure and traffic and environmental conditions there are trade-offs between the accuracy of indicators and their availability at reasonable cost, which have to be considered. Moreover, although real-time information would be a suitable source to assess the specific challenge in a detailed manner and determine critical values for automated driving, also the sources of the real-time information with regard to the actuality and especially reliability of data need to be considered (Rauniyar et al., 2018, UVEK - Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 2018).

5.1.5. Assessment of the automated drivability for the city of Vienna, Austria

Using the case study of the city of Vienna and building on the framework developed, a set of indicators for the components of the framework presented in Table 1 were derived and calculated to apply the framework developed and illustrate the automated drivability: the calculated indicators were combined and aggregated into an integrated automated drivability index (ADX) which provides an overview of the suitability of different parts of the street network in Vienna for the functioning use of ADSs.

5.1.5.1. Data: Road network and street segmentation

Data for the road network of the year 2018 for the whole administrative area of the city of Vienna were obtained from the Austrian Graph Integration Platform (GIP), a database owned by the different road operators (state, city) in Austria. Since this dataset contains all categories of roads, all roads not approved for motorized traffic (e.g. walking or cycling paths) were deleted. As the physical attributes and amenities vary within one street and intersections on the one hand, but a too small segment size would produce a large amount of noise on the other hand (Su et al., 2019), the road network was split up in street links with a length of a maximum of 100m (N=52.840), which seem most suitable to use as spatial reference units for the calculation of the indicators.

5.1.5.2. Indicators selection and calculation

Regarding the selection of the indicators all indicators presented in Table 1, for which the data was publicly available for the whole street network of Vienna were derived and calculated.

Table 2 gives an overview of the overall 20 calculated indicators and descriptive statistics. Data for the calculation of indicators were obtained from publicly available information from the database of the road operators (GIP), the city of Vienna as well as ZAMG (Austrian Institute for Meteorology and Geodynamics). The calculation was carried out by means of ArcGIS: In general, for numerical indicators (e.g. number of traffic lights) the respective values were calculated for each street link. For binary indicators (e.g. presence of pedestrian zone or encounter zone) street link values were rated 1 if the criterion was present; if the criterion was not present, street link values were rated 0. For categorical indicators (e.g. dominant age type of area) the different categories were assigned values from 0 to 1 with regard to their automated drivability. The indicators are described in the following for each component. However, it should be noted, that some of the indicators partly might also refer to other components (see Table 2).

5.1.5.2.1. Number of objects within the street space

Regarding the component number of objects within the street space in total five indicators were derived. Four indicators, number of traffic lights, road(way) type, number of traffic lanes, and number of public transit stations refer to the number of dynamic and static objects that have to be observed from the ADS. Only one of these indicators – number of traffic lights – indicate the number of objects to detect, in this case traffic lights, directly. The other indicators indicate the number of objects to detect only indirectly, as real-time information on the number of different road users on the road(way) or other data for potential indicators for this component were not publicly available. The road(way) type was used as an indicator for the number of motor vehicles and road(way) type categories were assigned values from 0 to 1 with regard to their associated number of motor vehicles, with higher values for residential streets (less motor vehicles to observe) and lower values for motorways (higher number of motor vehicles to observe). Similarly, the indicator number of traffic lanes was calculated for each street link, as a high number of traffic lanes usually implies a high number of motor vehicles that would needed to be detected by the ADS. Similarly, the number of public transit stations was used as indicator, with a high number of public transit stations tending to increase the presence of public transit vehicles as well as pedestrians in these areas, making it rather difficult to deploy AVs (Prakken, 2017).

Lastly, the number of obstructional objects was used as another indicator for this component and refers directly to the number of objects in the street space that might block the sensors vision. For calculating this indicator all publicly available data regarding obstructional objects like bushes, trees, benches, hydrants, post boxes, rubbish bins and parking meters were used.

5.1.5.2.2. Diversity of objects within the street space

With regard to the component diversity of objects within the street space five different indicators were calculated: presence of forbidden legal access for road(way) for pedestrians and cyclists, number of pedestrian crossings, presence of pedestrian or encounter zone, presence of non-structural separated bicycle infrastructure on road(way) and presence of tram tracks on road(way). All of the indicators indicate the presence of diverse road users only indirectly and were calculated as these were the only data publicly available for the entire street network in Vienna.

Table 2. Selected indicators for framework components.

Indicator	Indicator type	Framework component					Descriptive Statistics				Impact on suitability for ADSs
		Number of objects within the street space	Diversity of objects within the street space	Condition and configuration of the road infrastructure	Speed limit	Stability of the ODD	Maximum	Minimum	Mean	Standard deviation	
Road(way) type	Indirect, categorical						1 00	0 00	0 81	0 31	posi ive
Number of traffic lanes*	Indirect, numerical	✓	(✓)				6 00	1 00	1 16	0 49	nega ive
Number of traffic lights	Direct, numerical	✓		(✓)			4 00	0 00	0 94	0 30	nega ive
Number of obstructional objects	Direct, numerical	✓					27 00	0 00	0 54	1 20	nega ive
Number of public transit stations	Indirect, numerical	✓		(✓)			26 00	0 00	0 14	0 59	nega ive
Presence of forbidden legal access for road(way) for pedestrians and cyclists	Indirect, binary		✓				1 00	0 00	0 06	0 24	posi ive
Number of pedestrian crossings	Indirect, numerical	(✓)	✓				4 00	0 00	0 12	0 35	nega ive
Presence of pedestrian or encounter zone	Indirect, binary	(✓)	✓				1 00	0 00	0 01	0 07	nega ive
Presence of non-structural separated bicycle infrastructure on road(way)	Indirect, binary	(✓)	✓				1 00	0 00	0 19	0 39	nega ive
Presence of tram tracks on road(way)	Indirect, binary	(✓)	✓	(✓)			1 00	0 00	0 08	0 27	nega ive
Width of road(way)	Direct, numerical	(✓)		✓			48 00	2 00	8 31	3 24	posi ive
Frequency of different types of road surfaces	Direct, numerical			✓			8 00	0 00	1 84	1 05	nega ive
Type of intersection	Direct, categorical			✓			1 00	0 00	0 68	0 23	posi ive
Presence of tunnel or underpass	Direct, binary			✓			1 00	0 00	0 01	0 75	nega ive
Dominant land use type of area	Indirect, categorical			✓			1 00	0 00	0 56	0 25	posi ive
Dominant age of area	Indirect, categorical	(✓)		✓			1 00	0 00	0 58	0 38	posi ive
Maximum speed limit	Direct, numerical				✓		120 00	4 00	38 87	14 36	nega ive
Variation of congestion on road(way) throughout the day	Indirect, categorical	(✓)				✓	2 30	0 00	0 11	0 19	nega ive
Yearly average number of days with rain at the road(way)*	Indirect, numerical					✓	118 00	83 00	90 53	4 99	nega ive
Yearly average number of days with snow at the road(way)	Indirect, numerical					✓	59 00	19 00	31 77	4 81	nega ive

✓ = indica or fully represen ing framework componen (✓) = indica or par ly represen ing framework componen

*indica or no selec ed for indica ors in egra ion

At road(way)s with a forbidden legal access for pedestrians and cyclists, such as motorways or specific segments (e.g. expressways) and underpasses in the lower level road network, usually road users other than motor vehicles are not present and therefore these street spaces tend to have better conditions for ADSs since detecting such road users and anticipating their behaviour is not needed there most of the time (Shladover, 2018b). On the other hand, the indicators number of pedestrian crossings and presence of pedestrian or encounter zone were calculated to account for the presence of other road users, especially pedestrians, as a higher number of pedestrian crossings or the presence of a pedestrian or encounter zone implies the presence of pedestrians and partly also cyclists in this area whose identification and anticipation of movements is problematic (Shladover, 2018b) and also led to incidents/disengagements more frequently (Favarò, et al. 2018). Similarly, the indicator presence of non-structural separated bicycle infrastructure on the road(way), i.e. bicycle lanes, multi-purpose lanes, bicycle streets, cycle routes, cycle crossings, cycling against the one-way-street, cycling on bus lanes, was calculated and implies the presence of cyclists on the road that are not physically separated from motor vehicles. Lastly, the indicator presence of tram tracks on the road(way) was derived and indicates the potential presence of trams on the road(way) which might pose problems for ADSs regarding their detection and anticipating their behaviour especially at stations. Moreover, detecting the road(way) for ADSs might be more difficult with existing tram tracks on the roadway.

5.1.5.2.3. Condition and configuration of the road infrastructure

Regarding the component condition and configuration of the road infrastructure six indicators were derived: width of road(way), frequency of different types of road surfaces, type of intersection, dominant land use type of area, presence of tunnel or underpass and dominant age of (the buildings of the) area. Four of these indicators, frequency of different road surfaces, width of road(way), type of intersection and presence of tunnel or underpass represent the respective challenge for ADSs directly. Regarding the condition of the road infrastructure, the indicator frequency of different road surfaces refers directly to the challenge that different types of road surfaces and with that different colour values of the road surface can be problematic for the sensors and the software of ADSs (Fellendorf, 2018, Alkim, 2010). Regarding the configuration of the road infrastructure, the indicator width of road(way) refers directly to the circumstance, that wider road(way)s have better conditions for ADSs, since the field of vision for the sensors monitoring the environment tends to increase and the prediction of objects in the environment tends to be better (Campbell et al., 2010, Prakken, 2017). The indicator type of intersection accounts for the circumstance that intersections imply a higher difficulty for ADSs as they incorporate numerous traffic relations and especially at unsignalized intersections the behaviour of the vehicle is dependent on the detection and anticipation of the movements of numerous other road users and vice versa (Radwan et al., 2017). For this indicator, the different types of intersections were assigned values between 0 and 1 with regard to their automated drivability with higher values for no intersections or three arm signalised intersections (less complex) and lower values (more complex) for five or more arm intersections and roundabouts. The indicator presence of tunnel or underpass directly illustrates areas in the street network where GPS positioning signals can be blocked. The two calculated indicators dominant land use type of area and dominant age of area however are indirect indicators: For the two indicators, values were assigned to their different types from 0 to 1 with regard to their automated drivability with higher values for industrial areas or areas built in the 1960–1980s (car-friendly areas) and lower values for business districts and areas

of the Gruenderzeit (period of time in the 19th century), as the former imply more overseeable street spaces and are much more adapted to the automobile and thus provide easy conditions for the perception task (Prakken, 2017). Additionally, in street spaces in these areas there often is a much clearer separation between different types of road users (e.g. pedestrian underpasses).

5.1.5.2.4. Speed limit

For this component the maximum speed limit was used as an indicator, directly illustrating areas in the street network with higher speeds of vehicles and thus a lower reaction time for the ADS and its tasks. In these areas complexity for ADSs is higher, as a much faster computational time of the system, e.g. faster and more efficient mapping algorithms for localization, faster environmental perception, are needed (Pendleton et al., 2017, Van Brummelen et al., 2018).

5.1.5.2.5. Stability of the ODD

For the component stability of the ODD overall three indicators were derived, however only indirectly representing traffic and environmental conditions that pose challenges for ADS as real-time information on traffic and environmental conditions for the entire street network in Vienna is not publicly available. To account for varying weather conditions, the two indicators yearly average number of days with snow at road(way) and yearly average number of days with rain at road(way) were calculated based on publicly available interpolated climate data for Vienna of the time span of 30 years from ZAMG (Böhm & Potzmann, 1999): street spaces with a lower yearly average number of days with snow and days with rain imply more stable and good weather conditions and thus a higher suitability for ADSs. Moreover, the indicator variation of congestion on road(way) throughout the day was used to account for varying traffic conditions within street spaces. This indicator was calculated based on digitalised traffic data from Google Traffic, looking on the variation of congestion, i.e. variance of values with a scale from free flow/fast (1) to stop and go/slow (4), of street spaces between peak hours (9 am and 6 pm) and off-peak hours (6 am and 9 pm) on a typical weekday (Wednesday). Note that this is the only indicator which was not publicly available per se (rather associated with more time to be obtained than easily accessible), but nevertheless was considered.

5.1.5.3. Indicators integration

As it requires no significant or at least weakly significant correlations among the indicators for their integration (Su et al., 2019), Pearson's correlation was employed to test the correlations among the different indicators at street link level before their integration. For indicators integration, indicators were selected in the form that, if one pair of the different indicators for the same component presented a statistically significant, high correlation coefficient of $\pm 0,5$ or higher, only one of them was selected, whereas the other indicator was discarded. Using this approach, for the component number of objects within the street space the four indicators road(way) type, number of traffic lights, number of public transit stations and number of obstructional objects were obtained, whereas the indicator number of traffic lanes was discarded as it was statistically significantly highly correlated with the road(way) type. For the components diversity of objects within the street space and condition and configuration of the road infrastructure all indicators were considered, as there were no statistically significantly high correlations between the respective indicators. Regarding the component stability of the ODD the indicators variation of congestion on road(way) throughout the day and yearly

average number of days with snow at road(way) were obtained, whereas the indicator yearly average number of days with rain was discarded because of a statistically significant high correlation with the indicator yearly average number of days with snow at the road(way). Thus, in total 18 indicators were obtained, which are illustrated in bold in Table 2.

In order to combine and integrate the indicators, the values for each indicator were normalized and standardized by using Eq. (1).




$$\begin{cases} \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}}, & \text{positive} \\ \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}}, & \text{negative} \end{cases} \quad (1)$$

where X_{ij} is the value of indicator i for street link j and $\max X_{ij}$ and $\min X_{ij}$ are the maximum and minimum values of indicator i for all street links in the study area. Whereas positive indicators represent those where a larger value of the indicator characterises higher automated drivability (e.g. width of road(way)), negative indicators represent those where a lower value of the indicator characterises higher automated drivability (e.g. number of traffic lights) (Table 2).

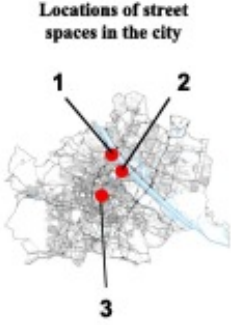
Regarding the integration of the various indicators, several alternatives are possible. In studies on walkability and bikeability often a weighting of the different components of the indicators is applied. This is mostly based on (a) a survey with users (Kelly et al., 2011), (b) reviewing the relevance of indicators and weighting in the literature/former studies (Nykiforuk et al., 2016) or (c) a consultation of decision-makers and experts (e.g. Moura et al., 2017). As AVs cannot be experienced by users to a larger extent so far, we based our weighting on the relevance of the components described in the literature as well as internal discussions on the importance of the different components. Current literature in particular emphasizes the presence of road users other than motor vehicles (Van Brummelen et al., 2018, Shladover, 2018b, Braun et al., 2018), the operating speed (Pendleton et al., 2017, Shladover, 2018a) and the condition and configuration of the road infrastructure (Favarò, et al., 2018, Van Brummelen et al., 2018) as highly relevant. Therefore, a variety of different weights for the components – with higher weights for the components diversity of objects within the street space, speed limit and condition and configuration of the road infrastructure, as these were described of high relevance in the literature, and lower weights for the components number of objects within the street space (only relevant if objects are diverse) and stability of the ODD (only representing overall conditions with regard to traffic or weather, at least with the indicators derived based on publicly available data) – have been discussed by using various exemplary images of street spaces in Vienna and comparing their different values. Table 3 gives an exemplary overview of this evaluation and exemplary weightings in comparison with equal weighting of components. Based on this comparison, the following weighting of the components was chosen (indicated in bold in Table 3): The component diversity of objects within the street space was weighted highest (weight of 6), as this component is relevant for both the perception and planning task, followed by the component speed limit (weight of 3), the component condition and configuration of the road infrastructure (weight of 3), the component number of objects within the street space (weight of 2) and the component stability of the ODD (weight of

1). Initially it was discussed to weight the component speed limit higher (like in weighting 2 in Table 3), however the comparison of the various weightings for the different street spaces in our view overall showed more plausible results for the weighting described above (weighting 3 in Table 3), although even with equal weights (weighting 1 in Table 3) the results appeared fairly appropriate.

Table 3. Exemplary comparison of different weightings for the components based on their relevance in the literature and internal discussions and resulting ADX values for different exemplary street spaces.

Components	Weighting 1: Equal weight of components	Weighting 2: Descending weights from 5 to 1	Weighting 3: Descending weights with higher weight for C2
	Weights		
C1: Number of objects in the street space	3 (0,200)	2 (0,133)	2 (0,133)
C2: Diversity of objects within the street space	3 (0,200)	5 (0,333)	6 (0,400)
C3: Condition and configuration of the road infrastructure	3 (0,200)	3 (0,200)	3 (0,200)
C4: Speed Limit	3 (0,200)	4 (0,266)	3 (0,200)
C5: Stability of ODD	3 (0,200)	1 (0,066)	1 (0,066)
Street spaces	Values of the integrated ADX		
1  Limited-access expressway	0,792	0,794	0,827
2  Intersection with tram station	0,608	0,535	0,517
3  Distributor road with bus station	0,692	0,642	0,627

Locations of street spaces in the city



Subsequently, the indicator values for each street link were combined by an addition of the values of the indicator for each component and divided by the number of indicators per component as well as multiplied by the respective weight to build the aggregated value of the ADX for each street link using Eq. (2).

$$X_{ADXj} = 0.133 * ((Xc1_{i1j} + Xc1_{i2j} \dots) / Ic1_n) + 0.400 * ((Xc2_{i1j} + Xc2_{i2j} \dots) / Ic2_n) + 0.200 * ((Xc3_{i1j} + Xc3_{i2j} \dots) / Ic3_n) + 0.200 * ((Xc4_{i1j} + Xc4_{i2j} \dots) / Ic4_n) + 0.066 * ((Xc5_{i1j} + Xc5_{i2j} \dots) / Ic5_n) \quad (2)$$

where X_{ADX_j} is the value of the ADX for street link j ; $Xc1_{i_j}$ is the value of indicator $i1$ of component 1, $Xc1_{i_2j}$ is the value of indicator $i2$ of component 1 ... ; $Xc2_{i_j}$ is the value of indicator $i1$ of component 2, $Xc2_{i_2j}$ is the value of indicator $i2$ of component 2 ...; and $Ic1_n$ is the total number of indicators for component 1 and $Ic2_n$ is the total number of indicators for component 2 ...

5.1.5.4. Results

Fig. 3 shows the results of the integrated ADX for the city of Vienna as well as the results for its five sub-components. From the results of the integrated ADX it is very good observable that especially urban motorways and expressways – although having a high maximum speed limit and a higher number of motor vehicles – show relatively high values of the ADX, as a forbidden access for pedestrians and cyclists is present. However, segments of these roads with tunnels or with a high variation of traffic throughout the day or a high yearly average number of days with snow (especially in the far West) show lower values. The lowest values of the ADX can be observed in the central districts of the city, where often complex intersections, narrow streets as well as pedestrian crossings or non-structural separated bicycle infrastructure on the roadway are present. This is amplified in streets with a higher speed limit, a high number of motor vehicles, tram tracks on the roadway and public transit stations. On the opposite, particularly in areas in the outskirts as well as in areas east of the Danube river where the latter aspects are not present and speed limits are lower, higher values of the ADX can be observed.

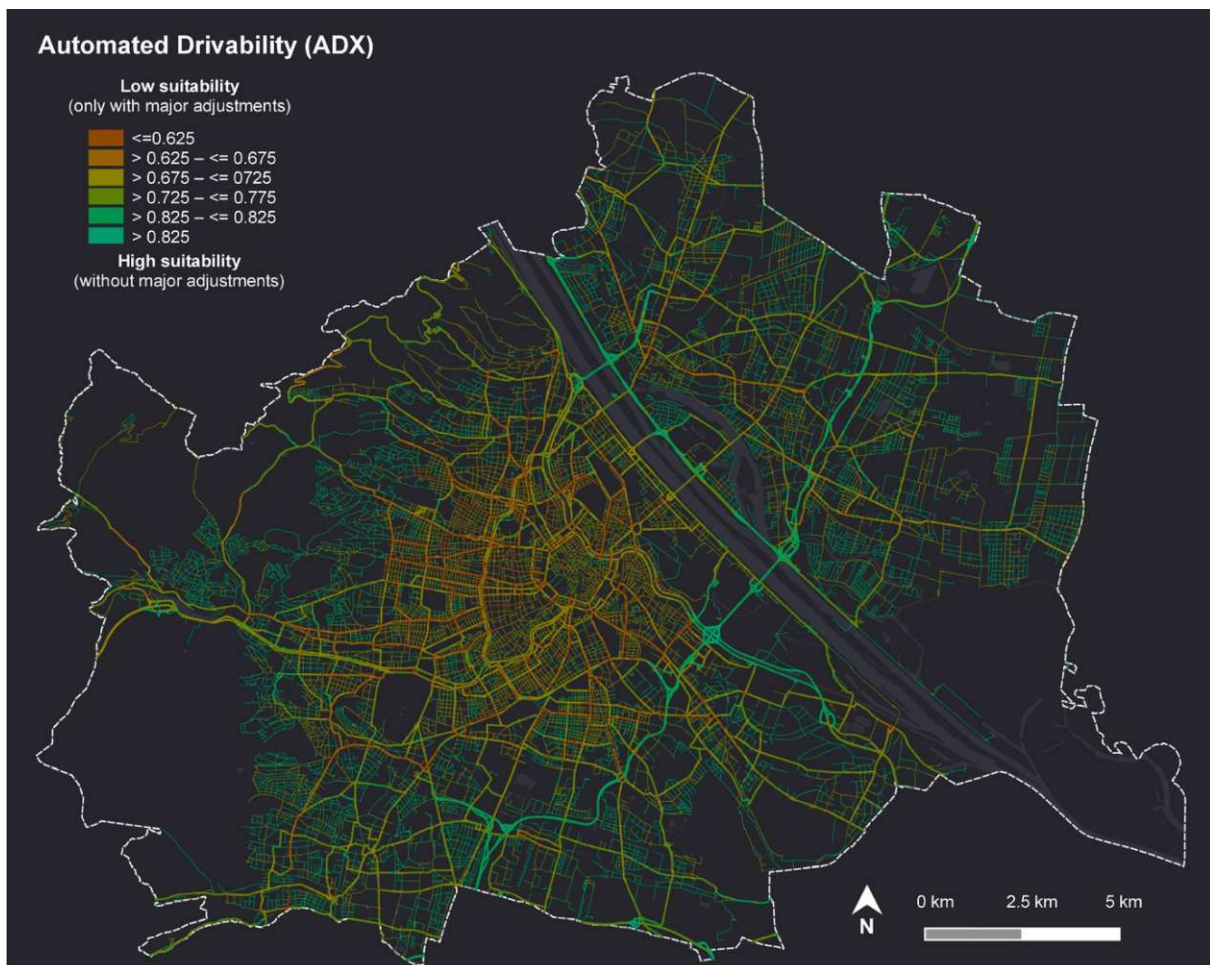




Fig. 3. Assessment of the automated drivability for the city of Vienna based on the values of ADX (above) and assessment for the five different components (below).

The index for the sub-component number of objects within the street space shows lower values at high-ranking roads and parts of the central districts (e.g. at public transit stations) and higher values at roads of the lower level road network. The index for the sub-component diversity of objects within the street space shows lower values in the central districts and for specific roads from the city centre to the outskirts incorporating tram tracks or non-structural separated

bicycle infrastructure, whereas areas in the outskirts and limited-access expressways and motorways experience higher values. Similarly, for the component condition and configuration of the road infrastructure, inner (often older) parts of the city show low values, whereas motorways and some parts (e.g. industrial areas) in the outskirts experience higher values. For the component speed limit, distinctively lower values are observable on motorways and the primary road network, whereas smaller roads in the city centre but also in the outskirts exhibit higher values. Lastly, the index for the sub-component stability of the ODD shows lower values in the north-western, more hilly districts (with a higher yearly average number of days with snow) as well as for some streets around the city centre and some parts of urban motorways, whereas higher values are observable in the south-west of the city centre.

5.1.6. Assessment of the automated drivability for the city of Vienna, Austria

This paper developed a framework to assess the automated drivability of street spaces, i.e. the suitability of streets spaces for AVs, based on the current state of technology and characteristics of street spaces, and explored indicators and sources of data that could represent the suitability of street spaces for ADSs, i.e. the level of challenge or complexity for ADSs in different parts of the street network. To apply the framework, for the case study of Vienna a set of indicators explored for the different components of the framework based on publicly available data for the whole street network in Vienna were derived and combined to build an integrated automated drivability index (ADX) and illustrate the suitability of different areas for the operation of ADSs.

The framework developed gives a comprehensive overview of the current challenges for ADS as well as indicators and sources of data to represent the challenges or complexity to ADSs in different parts of a street network. Although any such list is unlikely to be complete it gives a good overview which indicators can be used and how to best illustrate the different complexity for ADSs in the street network. This presented framework and the indicators explored are first steps of how an assessment of the suitability of different parts of the street network could be made and how the identification of initial potential areas for ODDs for ADSs could be tackled without actually driving an AV in an area and identify, calculate and map disengagements or perception failures. However, exploring the different indicators that could represent the challenge for ADSs in the street network also showed the trade-offs between data availability and accuracy of indicators. Whereas for some of the challenges for ADSs their direct illustration in the street network is possible with data that is fairly available (e.g. number of traffic lights to detect), for other challenges real-time information regarding the respective challenges (e.g. presence/number and behaviour of pedestrians) would be needed, that is often unavailable or associated with high costs, i.e. financial and time resources. Using indicators not directly representing the specific challenges instead are more easily available, however they can represent the challenge for ADSs in the street network only approximately. But, although not for all challenges direct indicators are fairly available, at least the majority of challenges can be reflected using direct indicators with fairly available data. And thus, even though using only a subset of indicators and partly indirect indicators linked with approximations, this is still useful for a first and general assessment especially with regard to city and transport planning purposes and gives a good basis for a further and more detailed analysis of potential ODDs.

To apply the framework to a specific street network and illustrate the different suitability of street spaces the case study of Vienna was used: only those indicators representing the challenges for ADSs explored whose data were publicly available for the whole street network in Vienna were derived and combined to build an integrated automated drivability index (ADX) and illustrate the suitability of different areas for the operation of ADSs. Although mostly indicators were used that represent the respective challenge for ADSs in the street network only indirectly (e.g. presence of non-structural separated bicycle infrastructure on the road(way) only indirectly implies a higher probability of bicyclists present at this street link), overall the results for the case study of Vienna seem reasonable: Overall the older inner city centre parts of central Vienna with its many nested streets (although having rather low operating speeds), often complex intersections and integrated public transport as well as major roads with high operating speeds but often pedestrians and cyclists present that have to be detected tend to be less suitable for ADSs than urban motorways and expressways with a forbidden access for pedestrians and cyclists as well as some areas in the outskirts, where wide and open streets and less pedestrians, cyclists and public transport as well as also low operating speeds in residential areas are present. However, applying the framework also allows for a much more differentiated view as the results also indicate some areas in more central parts of the city that have a high(er) suitability for ADSs and likewise also some areas more in the outskirts that have a low(er) suitability for ADS.

Moreover, comparing various ADX values from different weightings of the components based on their relevance emphasized in the literature, not only determined the most plausible weighting of the components in line with current literature, but furthermore also indicated, that even the results without weights seemed fairly adequate.

The developed systematic framework to assess the combination of factors that reflect the complexity for ADSs thus seems to be an adequate approach to an appropriate first and differentiated assessment of the suitability of street spaces for the operation of ADSs in a street network. Using this systematic framework has the advantage of having a first assessment that can be used for a proper analysis and discussion, rather than being dependent solely on simple intuition or the views of experts in the field or on a limited set of tests with ADSs, that only capture specific streets on specific moments, not necessarily in critical conditions. Based on this assessment possible initial ODDs can be developed that with more empirical testing could be further defined to more rigorous ODDs. Moreover, as at least several of the data for the indicators representing the challenges for ADSs are publicly available or owned/obtained by governmental bodies and public authorities, adopting the framework to other cities for having a first assessment on the suitability of street spaces for ADSs is easily possible.

However, the accuracy of such an assessment of the suitability of street spaces for ADSs is heavily dependent on the available data for calculating the respective indicators representing the different challenges. As also shown in the overview of indicators for representing the different challenges, to further improve the accuracy of the assessment different other than publicly available data would be needed. Whereas with regard to some of the challenges data sources like HD Maps, street view services (e.g. Google Street View, Mapillary), transport models, crowd sourced data (e.g. Strava) or datasets of manufacturers (OEMs) could help to better represent the respective challenge, especially real-time information on the presence of different dynamic objects, on the condition of the road infrastructure as well as on traffic

conditions (e.g. construction works) and weather conditions is needed. This would result in an assessment of the suitability of road spaces for ADSs that is changing dynamically in real-time. Hence, future work has to be done on how to incorporate such data to increase the accuracy of the assessment and not being dependent on indirect indicators representing the respective challenge only approximately. Here, at least real-time data from Google Traffic API, the road operator or weather stations are relevant. Moreover, the indicators could be further adapted in future work based on technological developments in the area of sensors or software of ADSs. However, the requirements on the accuracy of the indicators representing the challenges for the ADSs clearly also depend heavily on the intended purpose of the assessment: Whereas for questions with regard to city and transport planning or location development even an assessment with indicators based on publicly available data could give a broad overview and first hints of a possible deployment AVs in cities, for further specifying and lastly defining more rigorous ODDs however, more precise and costly indicators and moreover, empirical testing in the potential ODDs assessed are needed.

In addition, future work should further investigate the combination of the different possible indicators representing the challenges for ADS: the derived indicators for Vienna were combined by using different weights for each of the components based on the relevance of these factors mentioned in current literature and internal discussions. However, further research is needed to discuss and determine how to best combine the indicators. This is particularly true, when taking dynamic indicators for the components number of objects within the street space and stability of the ODD based on real-time information (e.g. the actual weather conditions) into account. A potential approach for that could be a discussion or weighting by experts in the field with regard to the specific relevance of the indicators and especially their interrelation, e.g. presence of pedestrians or cyclists combined with high speeds or high speeds combined with bad weather conditions.

Finally, as mentioned above, the approach of a broad practical evaluation of existing real ADSs in the investigated areas would be highly interesting to see whether the incident reports of such an experiment will show a higher number of incidents in map areas identified as difficult for AVs, but currently seem out of scope due to availability and legal reasons.

However, the assessment of the automated drivability for the city of Vienna with the currently used indicators based on publicly available data already shows results coherent with current literature, indicating that cities do not represent homogenous spaces for the use of AVs, but detailing the complexity of driving urban street spaces for ADSs at a yet unprecedented level. Considering this heterogeneity of street spaces and their conditions in cities, the advantages and disadvantages of deploying level 4 AVs would be unevenly distributed over urban street spaces leading to a spatial selective use of AVs. It is speculated that this might be a feature with higher relevance for cities with historic urban districts in Europe, parts of Asia and South America compared to the more spacious, gridiron layout of North American and Australian cities, indicating possible spatial disparities with regard to the deployment of AVs on a global level. As a consequence of the heterogeneity of different street spaces, shifts in location favourability caused by a selective AV accessibility in passenger and freight transport seems likely. It can be seen that parts of the often disperse urban areas in the outskirts tend to have an advantage over older, mostly more complex city quarters in the centre. While in the former case AVs could be deployed without (major) adjustments and probably relatively soon, in the

latter case the use of AVs would be conceivable only if (a) major adjustments were made to the street space (physical infrastructure), (b) the speed for all vehicles would be reduced (compared to the current state), i.e. higher reaction time for AVs and harmonization of speeds, or (c) a retrofitting/support due to digital infrastructure takes place. Nevertheless, both cases have impacts for cities: from a technological point of view this might affect AV deployment in more suitable areas and thus impacts due to the deployment of AVs in these areas on the one side and might also affect the possible building of physical (and digital) infrastructure in less suitable areas on the other side.

Moreover, as the European Commission proposes to create “level 4 islands” which can gradually grow in cities, the results of the application of the framework developed in combination with the functionality and ODD of the respective use case could give first hints in which areas of the cities such level 4 islands could be created (or could occur due to its characteristics) without larger adjustments and in which areas a deployment would need larger adaptations (European European Commission, 2017, Thorn et al., 2018). This is especially relevant for policy makers to develop concepts and strategies using different use cases in line with current and future urban policy goals and the framework presented even using mostly indicators based on publicly available data is a first, nonetheless important step in this direction. Moreover, such an assessment gives first differentiated information regarding the possible impacts of AVs in cities. Therefore, based on such an assessment and knowledge of the respective area it might be easier to formulate policies for the deployment of level 4 AVs with regard to specific adjustments (infrastructural, speed) which might be needed in specific areas at least in the near future as well as with regard to current urban policy goals. In addition, on the basis of the assessment of automated drivability, it could be further analysed which social groups live in the respective areas or which types of mobility dominate there e.g. by using spatial regression techniques (Su et al., 2019) in order to analyse the impacts of AVs in the different areas. This knowledge would be of high importance to policy and planning in order to formulate and differentiate possible actions.

5.1.7. References

- Alkim, T., 2010. The ODD framework. In: Presentation at the Automated Vehicles Symposium 2018, July 9-12, San Francisco.
- Anguelov, D., 2019. Taming the long tail of autonomous driving challenges. Presentation at the MIT course “Deep Learning for Self-Driving Cars”, 15.01.2019, Cambridge. <https://sites.google.com/g2.nctu.edu.tw/2019-self-driving-cars/lectures>.
- Bagloee, S.A., Tavana, M., Asadi, M., Oliver, T., 2016. Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. *J. Modern Transportation* 24 (4), 284–303.
- Beiker, S., 2018. Deployment of automated driving as an example for the San Francisco Bay area. In: Meyer, G., Beiker, S. (Eds.), *Road Vehicle Automation 5*. Springer, Cham, pp. 117–129.
- Birkmann, J., 2006. Indicators and criteria for measuring vulnerability: Theoretical bases and requirements. In: Birkmann, J. (Ed.), *Measuring Vulnerability to Natural Hazards. Towards Disaster Resilient Societies*. United Nations University Press, Tokyo, pp. 55–77.
- Boggs, A.M., Wali, B., Khattak, A.J., 2020. Exploratory analysis of automated vehicle crashes in California: A text analytics & hierarchical Bayesian heterogeneity- based approach. *Accid. Anal. Prev.* 135, 105354.
- Böhm, R., Potzmann, R., 1999. Systematic climate mapping in complicated terrain. Part one: From point information to maps of means. *OGM Bull.* 21–29.
- Braun, M., Krebs, S., Flohr, F., Gavrilă, D.M., 2018. The EuroCity persons dataset: a novel benchmark for object detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- Buck, C., Tkaczick, T., 2014. Geographische Informationssysteme. In: Bucksch, J., Schneider, S. (Eds.), *Walkability. Ein Handbuch zur Bewegungsförderung in der Kommune*. Hans Huber, Bern, pp. 165–177.
- Bugala, M., 2018. Algorithms applied in autonomous vehicle systems. *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe* 50 (4), 119–138.
- Burton, E., 2002. Measuring urban compactness in UK towns and cities. *Environ. Planning B: Planning Des.* 29, 219–250.
- Campbell, M., Egerstedt, M., How, J.P., Murray, R.M., 2010. Autonomous driving in urban environments: approaches, lessons and challenges. *Philos. Trans. Royal Soc. A* 368, 4649–4672.
- Carreras, A., Daura, X., Erhart, J., Ruehr, S., 2018. Road infrastructure support levels for automated driving. In: Paper presented at the 25th ITS World Congress, 17- 21 September 2018. Copenhagen. https://www.inframix.eu/wp-content/uploads/ITSWC2018-ASF-AAE-Final-paper_v4.pdf.
- Czarnecki, K., 2018. Operational design domain for automated driving systems. Taxonomy of Basic Terms. Requirements Analysis Framework for Automated Driving Systems. WISE Lab. Waterloo.

- Dempsey, D., 2019. 11 Myths About GPS for Autonomous Vehicles. *ElectronicDesign*.
<https://www.electronicdesign.com/automotive/11-myths-about-gps-autonomous-vehicles..>
- Department for Transport, 2007. *Manual for Streets*. London.
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/341513/pdfmanforstreets.pdf.
- European Commission, 2017. *C-ITS – Cooperative Intelligent Transport Systems Platform. Final report Phase II*.
- EuroRAP, 2018. *Roads that cars can read III. Tackling the Transition to Automated Vehicles*. Brussels.
- Farah, H., Erkens, S.M.J.G., Alkim, T., van Arem, B., 2017. Infrastructure for automated and connected driving: state of the art and future research directions. In:
- Meyer, G., Beiker, S. (Eds.), *Road Vehicle Automation 4*. Springer, Cham, pp. 187–197.
- Favarò, F.M., Nader, N., Eurich, S.O., Tripp, M., Varadaraju, N., 2017. Examining accident reports involving autonomous vehicles in California. *PLoS ONE* 12 (9), 1–20.
- Favarò, F.M., Eurich, S., Nader, N., 2018. Autonomous vehicles' disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations. *Accid. Anal. Prev.* 110, 136–148.
- Fellendorf, M., 2018. *Straßenbauliche Infrastruktur und VLSA für automatisierte Fahrzeuge*. In: Presentation at the Workshop of the research project AUTO-NOM. Vienna.
- Fetka, J., 2018. What can urban planning learn from California's disengagement report 2017? *Avenue21*. <http://avenue21.city/what-can-urban-planning-learn-from-californias-disengagement-report-2017/>.
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2006. *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen*. RAS 06. Cologne.
- Fraade-Blanar, L., Blumenthal, M.S., Anderson, J.M., Kalra, N., 2018. *Measuring Automated Vehicle Safety*. RAND Corporation, Santa Monica.
- FSV – Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (2001): *RVS 03.04.12. Stadtstraßen. Stadtstraßenquerschnitte. Querschnittgestaltung von Innerortsstraßen*.
- ITF – International Transport Forum, 2018. *Safer Roads with Automated Vehicles?* OECD, Paris.
- Johnson, C., 2017. *Readiness of the Road Network for Connected and Autonomous Vehicles*. Royal Automobile Club Foundation, London.
- Kelly, C.E., Tight, M.R., Hodgson, F.C., Page, M.W., 2011. A comparison of three methods for assessing the walkability of the pedestrian environment. *J. Transp. Geogr.* 19, 1500–1508.
- Koopman, P., Fratrick, F., 2019. How Many Operational Design Domains, Objects, and Events? *Safe AI 2019: AAAI Workshop on Artificial Intelligence Safety*, Jan 27, 2019.
- Kopko, M., 2019. *Safe Integration of Automated Vehicles (AV) in Work Zones. Part 1. Project Narrative and Technical Approach*. Pennsylvania Department of Transportation. Harrisburg.
- Lv, C., Cao, D., Zhao, Y., Auger, D.J., Sullman, M., Wang, H., Dutka, L.M., Skrypchuk, L., Mouzakitis, A., 2018. Analysis of autopilot disengagements occurring during autonomous vehicle testing. *IIEE/CAA J. Automatica Sinica* 5 (1), 58–68.

- Madadi, B., van Nes, R., Snelder, M., van Arem, B., 2018. Assessing the travel impacts of subnetworks for automated driving: an exploratory study. *Case Stud. Transp. Policy*.
- Marshall, S., 2005. *Street & Patterns*. Spon Press, London.
- Metz, D., 2018. Developing policy for urban autonomous vehicles: impact on congestion. *Urban Sci.* 2 (33), 1–11.
- Mitteregger, M., Bruck, E., Soteropoulos, A., Stickler, A., Berger, M., Dangschat, J.S., Scheuven, R., Banerjee, I., 2020. *AVENUE 21. Automatisierter und vernetzter Verkehr. Entwicklungen des urbanen Europas*. Springer Vieweg.
- Moura, F., Cambra, P., Goncalves, A.B., 2017. Measuring walkability for distinct pedestrian groups with a participatory assessment method: a case study in Lisbon. *Landscape Urban Plann.* 157, 282–296.
- Nitsche, P., Mocanu, I., Reinthaler, M., 2014. Requirements on tomorrow's road infrastructure for highly automated driving. In: *Proceedings of the 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Vienna, 939-940. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7297694/>.
- Nowakowski, C., Shladover, S., Chan, C.Y., Tan, H.S., 2015. Development of California regulations to govern testing and operation of automated driving systems. *J. Transportation Res. Board* 2489 (1), 137–144.
- Nykiforuk, C.I.J., Mc Getrick, J.A., Crick, K., Johnson, J.A., 2016. Check the score: field validation of Street Smart Walk Scoe in Alberta, Canada. *Prev. Med. Rep.* 4, 532–539.
- Paden, B., Cáp, M., Yong, S.Z., Yershov, D., Frazzoli, E., 2016. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles. *IEEE Trans. Intell. Veh.* 1 (1), 33–55.
- Pendleton, S.D., Andersen, H., Du, X., Shen, X., Meghjani, M., Eng, Y.H., Rus, D., Ang Jr., M.H., 2017. Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles. *Machines* 5 (6), 1–54.
- Prakken, H., 2017. On the problem of making autonomous vehicles conform to traffic law. *Artif. Intell. Law* 25 (3), 341–363.
- Radwan, N., Winterhalter, W., Dornhege, C., Burgard, W., 2017. Why did the robot cross the road? - Learning from multi-modal sensor data for autonomous road crossing. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 24.-28. September 2017, Vancouver, pp. 4737–4742. <https://arxiv.org/abs/1709.06039>.
- Ramanagopal, M.S., Anderson, C., Vasudevan, R., Johnson-Robertson, M., 2018. Failing to learn: autonomously identifying perception failures for self-driving cars. *IEEE Rob. Autom. Lett.*
- Rauniyar, A., Hagos, D.H., Shrestha, M., 2018. A crowd-based intelligence approach for measurable security, privacy, and dependability in internet of automated vehicles with vehicular fog. *Hindawi Mobile Informations Syst.* 2018, 1–14.
- Ritz, J., 2018. *Mobilitätswende – autonome Autos erobern unsere Straßen. Ressourcenverbrauch, Ökonomie und Sicherheit*. Springer, Wiesbaden.

Rosique, F., Navarra, P.J., Fernández, C., Padilla, A., 2019. A systematic review of perception system and simulators for autonomous vehicles research. *Sensors* 19 (648), 1–29.

SAE International, 2016. Surface vehicles recommended practice. J3016. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, September 2016.

SAE International, 2018. Surface vehicles recommended practice. J3016. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, June 2018.

Shladover, S.E., 2018a. Connected and automated vehicle systems: Introduction and overview. *J. Intelligent Transportation Syst.* 22 (3), 190–200.

Shladover, S.E., 2018b. Practical challenges to deploying highly automated vehicles. Presentation at Drive Sweden. Göteborg, Sweden.
<https://www.drivesweden.net/sites/default/files/content/bilder/practicalchallenges4drivesweden.pdf>.

Shoettle, B., 2017. Sensor fusion: a comparison of sensing capabilities of human drivers and highly automated vehicles. SWT-2017-12, University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor.

Soteropoulos, A., Berger, M., Ciari, F., 2019. Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies. *Transp. Rev.* 39 (1), 29–49.

Su, S., Zhou, H., Xu, M., Ru, H., Wang, W., Weng, M., 2019. Auditing street walkability and associated social inequalities for planning implications. *J. Transp. Geogr.* 74, 62–76.

Thorn, E., Kimmel, S., Chaka, M., 2018. A framework for automated driving system testable cases and scenarios. Report No. DOT HS 812 623. NHTSA. Washington, DC.

Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., Diebel, J., Fong, P., Gale, J., Halpenny, M., Hoffmann, G., Lau, K., Oakley, C., Palatucci, M., Pratt, V., Stang, P., Strohband, S., Dupont, C., Jendrossek, L.E., Koelen, C., Markey, C., Rummel, C., van Niekirk, J., Jensen, E., Alessandrini, P., Bradski, G., Davies, B., Ettinger, S., Kaehler, A., Nefian, A., Mahoney, P., 2006. Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge. *J. Field Rob.* 23 (9), 661–692.

Thrun, S., 2010. Toward robotic cars. *Commun. ACM* 53 (4), 99–106.

Transport Systems Catapult, 2017. Future Proofing Infrastructure for Connected and Automated Vehicles. Technical Report. Milton Keynes.

Ulbrich, S., Menzel, T., Reschka, A., Schuldt, F., Maurer, M., 2015. Defining and substantiating the terms scene, situation, and scenario for automated driving. In: *Proceedings of the IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 15–18. Sept. 2015, Las Palmas, Spain.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7313256>.

UVEK – Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 2018. Bereitstellung und Austausch von Daten für das automatisierte Fahren im

Strassenverkehr. Bern. <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/intelligente-mobilitaet/studien-und-berichte.html>.

Van Brummelen, J., O'Brien, M., Gruyer, D., Najjaran, H., 2018. Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transp. Res. Part C* 89, 384–406.

Von Schirnding, Y., 2002. Health in Sustainable Development Planning: The role of indicators. World Health Organization, Geneva.

Wachenfeld, W., Winner, H., Gerdes, J.C., Lenz, B., Maurer, M., Beiker, S., Fraedrich, E., Winkle, T., 2016. Use cases for Autonomous Driving. In *Autonomous Driving*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 9–37.

Wahlster, W., 2017. Autonome Systeme: Grundlagen für das selbstfahrende Auto. Presentation within the lecture series, Künstliche Intelligenz für den Menschen: Digitalisierung mit Verstand“, 16th Mai 2017, Mainz. German Research Center for Artificial Intelligence.
http://www.dfki.de/wwdata/Gutenberg_Stiftungsprofessur_Mainz_2017/Autonome_Systeme.pdf.

Winters, M., Brauer, M., Setton, E.M., Teschke, K., 2013. Mapping bikeability: a spatial tool to support sustainable travel. *Environ. Planning B: Urban Analytics City Sci.* 40, 865–883.

6. Straßenräumliche Verträglichkeit unter Berücksichtigung der verkehrlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge

Straßenräume sind nicht nur Verkehrsräume, sondern gleichfalls auch Räume zum Aufenthalt von Menschen und unterliegen zum Teil vielfältigen Nutzungsansprüchen. Insbesondere Konflikte zwischen den Ansprüchen des motorisierten Verkehrs und den übrigen Bedürfnissen (z.B. andere Verkehrsarten wie Zufußgehen und Radfahren) sind nur bis zu einer gewissen Intensität verträglich. Inwieweit automatisierte Fahrzeuge aufgrund der mit ihnen verbundenen Wirkungen wie einer Zunahme der Verkehrsleistung sowie einer Erhöhung der Trennwirkung durch eine dichtere Fahrzeugfolge mit den jeweiligen übrigen Nutzungsansprüchen in verschiedenen Straßenräumen verträglich sind, wurde bisher jedoch noch nicht untersucht.

Im folgenden Artikel **„Compatibility of automated vehicles in street spaces: considerations for a sustainable implementation“**, der im Jahr 2021 in Sustainability (Impact Factor: 2.576 – 2019) veröffentlicht wurde, wird daher die Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen mit den Ansprüchen von NutzerInnen und Umfeldnutzungen in unterschiedlichen Straßenräumen untersucht.

Die Grundlage für die im Artikel durchgeführte Verträglichkeitsanalyse von automatisierten Fahrzeugen bilden drei verschiedene Szenarien mit automatisierten Fahrzeugen:

- 1) On-Demand Ride Service mit automatisierten Shuttles mit Tür-zu-Tür Beförderung
- 2) On-Demand Ride Service mit automatisierten Shuttles mit Haltestellen Beförderung und
- 3) Private automatisierte Fahrzeuge.

Die verkehrlichen Wirkungen dieser drei Szenarien wurden im Rahmen des Forschungsprojekts Auto.Waves von Trafility mittels MATSim am Beispiel von Wien modelliert (vgl. Trafility 2020). Aufbauend auf den Modellierungsergebnissen hinsichtlich der Veränderung der Anzahl der Kfz in der Spitzenstunde in den jeweiligen Szenarien wurde anschließend die Verträglichkeitsanalyse durchgeführt. Hierzu wurde für alle Straßenabschnitte des Straßennetzes Wiens jeweils eine maximal verträgliche Verkehrsbelastung (Anzahl Kfz in der Spitzenstunde) ausgehend von der Randbebauung und der angrenzenden Nutzung sowie unter Berücksichtigung weiterer (gewichteter) Einflussfaktoren, wie beispielsweise der Flächenaufteilung zwischen FußgängerInnen/ RadfahrerInnen und Kfz oder den bestehenden Querbeziehungen zwischen den beiden Seiten der Straßenräume, ermittelt. Die Verträglichkeit wurde dann anhand des Vergleichs der Verkehrsbelastung in den jeweiligen simulierten Szenarien mit der ermittelten maximal verträglichen Verkehrsbelastung für alle Straßenräume bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf die straßenräumliche Verträglichkeit für verschiedene Stadtgebiete unterschiedlich sind. Für On-Demand Ride Services mit automatisierten Shuttles ist vor allem in innerstädtischen, dichten Gebieten eine Verringerung der Verträglichkeit zu beobachten, da das Verkehrsaufkommen zunimmt und gleichfalls zahlreiche andere Nutzungsansprüche bestehen. Hingegen sind vor allem (auf Hauptverkehrsstraßen) in den Gebieten am Stadtrand Verbesserungen der Verträglichkeit möglich, wobei dies insbesondere im Falle eines On-Demand Ride Service mit automatisierten Shuttles mit Haltestellen Beförderung gilt. Private automatisierte Fahrzeuge in

Verbindung mit einer allgemeinen Kapazitätserhöhung würden hingegen vor allem im übergeordneten Straßennetz, das bereits heute ein unverträgliches Verkehrsaufkommen aufweist, zu einer Verringerung der Verträglichkeit führen, was die Trenn- bzw. Barrierewirkung solcher Straßen weiter erhöht.

6.1. Compatibility of Automated Vehicles in Street Spaces: Considerations for a Sustainable Implementation

Aggelos Soteropoulos^{1 2 *}, Martin Berger² and Mathias Mitteregger¹

¹ Future.lab, Technical University of Vienna, 1040 Vienna, Austria

² Institute for Transportation System Planning, Technical University of Vienna, 1040 Vienna, Austria

* Corresponding author: Aggelos Soteropoulos, Institute for Transportation System Planning, Technical University of Vienna, Karlsgasse 11, 1040 Vienna, Austria. E-Mail: aggelos.soteropoulos@tuwien.ac.at

Veröffentlicht 2021 in Sustainability, 13(5), 2732

Abstract

Automated Vehicles (AVs) will bring a fundamental change in the mobility sector in the coming years. Whereas many studies emphasize opportunities with AVs, studies on the impacts of AVs on travel behavior particularly show an overall increase in traffic volume. This increase could impair the needs of other uses and users within street spaces and decrease the permeability of the street space for pedestrians and cyclists. However, only a few studies, so far, have looked at the changes of traffic volume due to AVs at the street level, and to what extent these impair the needs of other uses and users within different street spaces was not in the focus at all. This paper investigates the compatibility of AVs in street spaces, building on different modeling results of scenarios with AVs based on the Multi-Agent Traffic Simulation (MATSim) framework. Using the so-called compensatory approach and the whole street network of Vienna, Austria, as a case study, we examine how compatible AVs and their related changes in traffic volume are with the needs of other uses and users, i.e., pedestrians and cyclists, within different street spaces, by specifically considering the various characteristics of the latter. Results show that the effects of AVs on the compatibility of street spaces would be unevenly distributed across the city. For Shared Automated Vehicles (SAVs), a deterioration in compatibility is observable, especially in inner-city dense areas, because of an increase in traffic volume and an already high amount of competing uses. In contrast, especially (on main roads) in the outskirts, improvements in compatibility are possible. This particularly applies to SAVs with a stop-based service. However, private AVs interlinked with an overall capacity increase would lead to a deterioration in compatibility, especially in parts of the higher-level street network that already have incompatible traffic volumes, further increasing the separating or barrier effect of such streets. The results can provide insights for policymakers and stakeholders about where and how to facilitate AVs, to reach an implementation that is compatible with the different uses and needs of users within street spaces: While SAVs should be implemented particularly in the outskirts, as a complement for public transport, an implementation of AVs in the lower-level street network in inner parts of the city should not be facilitated, or it should at least be linked to measures that make street spaces more compatible with the needs of pedestrians and cyclists, e.g., implementation of walking and cycling infrastructure.

6.1.1. Introduction

Automated Vehicles (AVs) will completely change our mobility and the way of moving from point A to point B. Already in the next years, dynamic developments with fundamental changes can be expected in the mobility sector which bring both opportunities and risks. From the point of view of transport planning, infrastructure planning, and city planning, strategies are needed to determine where and how AVs can be implemented in the best possible and sustainable way [1,2,3,4].

Several studies have already been carried out on the impacts of AVs on traffic, travel behavior, and land use, or on wider societal or environmental implications, which can serve as a basis for developing strategies and measures for political decision-makers. Opportunities of AVs mentioned in these studies include, amongst other things, higher capacity utilization of existing transport infrastructure, improved cost-effectiveness of public transport if costs of personnel can be reduced, and extended mobility options for specific user groups (e.g., mobility-impaired people) [1,5]. However, concerning the impacts on travel behavior, most studies assume that AVs will increase the attractiveness of vehicles and thus traffic volume, i.e., Vehicle-Miles-Traveled (VMT), in the areas intended for AVs due to numerous advantages in terms of comfort, use of in-vehicle time, and the possible mobilization of new user groups [6,7]. However, these changes in traffic volume due to AVs were mostly shown on a city-wide or transport-system level, but how they interfere within street spaces with their different adjacent uses and needs of users was hardly researched so far; however, this is of high relevance regarding implementation strategies for AVs in cities.

In principle, street spaces are subject to a wide range of competing usage demands and requirements and needs of people who want to move, stroll, meet, stay, sit, or play [8,9]. In addition to the traffic function of streets, the type and extent of further demands on street spaces result from their environment, i.e., the nature and extent of buildings and type of land usage along the street (surrounding uses) and the linkages between the two sides of the street [10,11]. These usage demands are partly contradictory, conflict with the traffic function of streets, and lead to conflicts of use within street spaces [12]. In particular, conflicts between the demands of motor vehicle traffic and the needs of other users, i.e., pedestrians and cyclists or users of micro-mobility (that move, stay, sit, etc., in the street space), are only reasonable up to a certain intensity or reasonable depending on the concrete situation. However, if the traffic volume of motor vehicles rises above this limit, it reaches a level of dominance that impairs the other needs of users of the street space to an extent that is no longer compatible [10,11,13].

Therefore, from a planning point of view, it is necessary to investigate to what extent the implementation and use of AVs in street spaces are compatible with the uses and needs of other users within street spaces due to the increase in traffic volume associated with AVs. This is all the more important as not only an increase in traffic volume might affect street spaces with AVs in the future, but also the traffic flow facilitated by AVs with short gaps between vehicles enabling higher capacity utilization of the transport infrastructure, leads to denser traffic. Pedestrians and cyclists could find gaps more difficult and the separating or barrier effect of the streets (also known as community severance), relating to both physical and psychological impediments to pedestrian and cyclist movements [14,15], is increased. This leads to a decreasing permeability of the street space for pedestrians and cyclists [16,17].

This paper investigates the compatibility of AVs and their related changes in traffic volume with the needs of other uses and users, i.e., pedestrians and cyclists, within different street spaces.

Using the case study of Vienna, Austria, first different scenarios with AVs are modeled, using the Multi-Agent Transport Simulation (MATSim) framework which was performed by Trafility (www.trafility.at (accessed on 21 January 2021)) to obtain potential changes in traffic volume due to AVs at the street level. Building on the modeling results, the so-called compensatory approach based on GIS is used to assess how compatible these changes in traffic volume due to AVs are with the needs of other uses and users in the street spaces, i.e., to what extent the changes in traffic volume due to AVs impair these needs, by specifically considering various characteristics of the street spaces. To the best of our knowledge, this has not been done before.

This paper is structured as follows. Section 2 presents related work on this topic and stresses the particular contribution of this study with regard to previous research. Section 3 describes the different scenarios with AVs and their modeling, using MATSim, as well as the compensatory approach for examining the compatibility of AVs within street spaces, based on the changes in traffic volume in the scenarios. Section 4 presents the results of the analysis of the compatibility of AVs within street spaces, using the case study of Vienna, Austria. Section 5 provides a discussion of the results and Section 6 closes the paper with a conclusion and possible future avenues of research.

6.1.2. Related Works

Investigating the impacts of AVs on travel behavior has been widely popular in the last years. Existing studies apply various models and simulations to analyze these impacts, as AVs are not yet available to the public at large, and gathering empirical data for further analysis is not possible on a large scale [16,18]. This includes existing travel demand modeling methods, including trip-based models [19], activity-based models [20,21] and agent-based models [22,23,24,25].

Besides using different methods to explore impacts, the studies also define different scenarios for the transport supply with AVs, i.e., by replacing all or a specific share of current private vehicle trips with Shared Automated Vehicles (SAVs) and private AVs [21,26], by splitting trips by modes, using a rule-based mode-choice model based on the existence/non-existence of public transport [22,27] or by incorporating SAVs and private AVs as a new transport option in the mode-choice model [19,28]. Moreover, studies also apply different assumptions for AVs, e.g., regarding the reduction of the Value of Time (VOT), because of increased comfort and productivity while traveling as a passenger, instead of concentrating on the driving task and increased road capacity, but also how SAVs are assigned and relocated or the size of SAVs and acceptable waiting times or operating costs [16].

Focusing on private AVs, Kim et al. [29], for example, used an activity-based model (including mode and trip-choice), assumed a change in road capacity by +50%, and indicated an increase in VMT by 4% for the Atlanta region in the US. The increase in VMT goes up to 13% when also assuming changes in the value of time by -50% for private AVs compared to current private cars. Zhao and Kockelmann [19] investigated the effects of both private AVs and SAVs in Austin, USA, using a trip-based model. They assume a reduction in VOT for both private AVs and SAVs by 50% compared to current private cars and operating costs of 1 \$ per mile and report an increase in VMT by 28%. Martinez and Viegas [30] assume a replacement of all motorized trips by SAVs with ridesharing and indicate also a decrease in Vehicle Kilometers Traveled (VKT) by 25% for the city of Lisbon, Portugal.

However, some of the earlier studies [31] did not consider congestion and explicit traffic assignment [32], while studies looking at the routing of AVs in congested areas stress the issue of balancing traffic flows [33,34]. In recent years, several studies looking at the impacts of AVs on travel behavior also used the agent-based model MATSim [23,24]. MATSim allows users to consider these issues and to obtain more realistic and executable travel plans under transport constraints, as well as for a more detailed investigation [23,35].

Boesch et al. [24], for example, used the MATSim framework and focused on the effects of both private AVs and SAVs in the city of Zug in Switzerland. They assume a reduction of the value of time for SAVs by 54%, compared to current private cars, as well as operating costs of 0.46 CHF/km (and a reduction of the value of time for private AVs and operating costs for private AVs and public transport), and indicate an increase in VMT by 16%.

Overall, the studies mostly indicate an overall increase in VMT due to private AVs and SAVs, unless there is a high share of people willing to share their ride and especially if a reduction in the value of time is assumed [16,36]. However, results on the changes in traffic volume, i.e., VMT, were mostly presented on a city-wide level and only a few of these studies also looked at changes in traffic volumes at the street level.

Friedrich and Hartl [27], for example, investigated the impacts of SAVs, using a macroscopic travel demand model, and assume a replacement of all private cars by SAVs with and without ridesharing (but existent public transit), for the region of Stuttgart in Germany. They indicate an overall increase in VKT by 18% for SAVs without ridesharing and an overall decrease in VKT by 20% for SAVs with ridesharing. However, when looking at the street level, mixed effects are shown. The results for SAVs with ridesharing show a reduction in traffic volume, especially on main roads in the outskirts, while some roads in the lower-level street network in inner parts of the city experience an increase in traffic volume. For SAVs without ridesharing, however, an increase in traffic volume is shown on most streets of the higher and lower-level street network.

Similarly, in a study by the International Transport Forum [22] the effects of SAVs with ridesharing are investigated for Lisbon, Portugal, using an agent-based model. They assume a replacement of all private cars by SAVs with ridesharing (but existent public transit) and report an overall decrease in VMT by 6%. When looking at the distribution of traffic volume at street level at peak hour, especially streets in the higher-level street network experience a drop in traffic. However, for streets of the lower-level street network in the city-center (especially in areas where traffic was previously largely absent), an increase in traffic is reported. It is also mentioned that this potential increase in traffic conflicts with walking and cycling in these areas. However, so far this circumstance, i.e., to what extent a possible increase in travel volume by AVs in specific areas impairs the needs of other users, e.g., pedestrians and cyclists, and uses or is compatible with these needs, was not investigated further for the case of AVs.

Several earlier studies address this aspect, although not in the context of AVs. These studies used different approaches to assess the compatibility of traffic with the needs of other uses and users, i.e., pedestrians and cyclists, and were used in the last years in Bühlmann and Laube [11], Frehn et al. [37], or Baier et al. [38]. Besides a lot of qualitative and broad approaches [37,38], one often applied and more comprehensive approach for this topic is the so-called compensatory approach by von Mörner et al. [39] which was refined by Bühlmann and Laube [11]. This approach assesses the compatibility of traffic with the needs of other uses and users in the street space by specifically taking into account the different characteristics, e.g., typology, area type, etc., of street spaces in a quantitative and more detailed way.

This paper differs from previous work, as it looks at the impacts of AVs on travel behavior, i.e., changes in traffic volume, at the street level based on outputs from different scenarios with AVs which were modeled with MATSim and allow for an investigation with great temporal and spatial detail. It further builds on these results and uses the compensatory approach based on GIS to assess the compatibility of these changes in traffic volume due to AVs with the needs of other uses and users in street spaces, which has not been done in other studies before.

6.1.3. Method

In order to investigate the compatibility of AVs in street spaces, an analysis on the traffic volume changes due to AVs at street level was performed for the case study of Vienna, building on outputs from different scenarios with AVs modeled in MATSim. Based on the modeling results on changes in traffic volume, i.e., number of vehicles at peak hour, at street level, the compensatory approach based on GIS is used to assess the compatibility of the changes in traffic volume due to AVs with the different demands of uses and users within street spaces.

6.1.3.1. *Data: Street Network and Street Segmentation*

Street network data of the year 2019 were obtained for the whole administrative area of the city of Vienna from the Austrian Graph Integration Platform (GIP). The GIP is a freely accessible administrative database owned by different road operators (state, cities, municipalities) in Austria which update this database [40]. Within this dataset, all streets not approved for motorized traffic (e.g., walking and cycling paths) were deleted. The street network was split up into street links with a maximum length of 100 m ($N = 52,840$), which proved to be the most suitable spatial reference units in order to investigate the compatibility of AVs in different street spaces. This was done because, on the one hand, the physical attributes and amenities vary within one street and its intersections, and on the other hand, a too-small segment size would produce a large amount of noise [41].

6.1.3.2. *Scenarios of AVs Modeled in MATSim*

The scenarios that build the basis for examining the compatibility of AVs in street spaces are based on MATSim, a large-scale agent-based transport simulation package that was used to model each person's activities in a realistic transportation network, i.e., city of Vienna, and to observe on an individual level how agents (representing travelers and vehicles) fare in the network [23,35] (The simulation within MATSim was carried out by Trafility and is described in more detail in [42]).

Within MATSim, all agents try to maximize their utility in a co-evolutionary iterative process until a dynamic user equilibrium is reached, meaning that no agent can further improve their mobility behavior by modifying their plan [23,43,44]. An iteration in MATSim generally consists of three steps:

In the first step, the plans, i.e., activities and connecting trips during a day, of all agents are simulated simultaneously based on input data of a synthetic population. A queue-simulation model is used which moves vehicles from link to link in the network. When the capacity limit of a link is reached, traffic slows down and congestion builds up on the upstream link. This way, the choices from the agents' plans directly affect the simulation travel times. Since this may introduce delays, the outcome of a plan is different than its initial version [44,45].

Therefore, the second step of the iteration is the scoring, i.e., comparing how well an initial plan worked out. The observed plan is translated into a utility value (score) based on a

predefined utility function (e.g., performing an activity is increasing utility while driving a car or having to wait for a bus is decreasing utility). This utility function accounts for both the travel and the activities (Equation (1)). The final score is assigned to the selected plan of the agent. Over time, agents can collect such plans in their memory which has a predefined size of N past plans [23,45].

$$U = \sum_{i=1}^q U_{travel,i} t_{travel,i} + \sum_{j=1}^{q+1} U_{activity,i} t_{activity,j} \quad (1)$$

of travel for i th trip in a day; $i = 1, 2, 3, \dots, q$ trips; $t_{travel,i}$; i = Travel time for i th trip; $U_{activity,j}$; j = Utility of performing the j th activity in a day; $j = 1, 2, 3, \dots, q + 1$ activities; and $t_{activity,j}$; j = Duration of j th activity [23,35]

The last stage of the iterative process is re-planning: For each agent, a re-planning strategy is chosen. This may be a selection strategy (i.e., selecting from an agent's memory a plan based on its utility) or an innovation strategy, where a certain plan of an agent is duplicated and modified in a specific way (e.g., choosing a different departure time for a trip). Finally, if this leads to a state where an agent has more than N plans in memory, a removal procedure is applied, that chooses a plan to be deleted from the memory. In the next iteration, the selected/modified plans will be executed, scored, re-planned, and so on, until a dynamic user equilibrium is reached, i.e., no agent can further improve their mobility behavior by modifying their plan [23,35,45].

Input data for start points, end points, and times of activities of agents within the simulation, i.e., their daily activities and times, were obtained from mobile phone data, i.e., anonymized motion trajectories from location area updates of mobile phones connecting to radio cells, from the Austrian national mobile phone provider A1. Based on an automated process to detect anonymized movement trajectories from the mobile phone data, a randomized data sample was generated and spatially distributed over the entire analysis area, which formed the basis for the synthetic population used for the simulation. Figure 1 shows the spatial distribution of activities, as well as the number of activities carried out throughout the day, based on the mobile phone data. By using detailed mobile phone data, daily activities, and times were derived, which improved the assessment of AVs' impact on travel behavior and the mapping of temporal-spatial relationships.

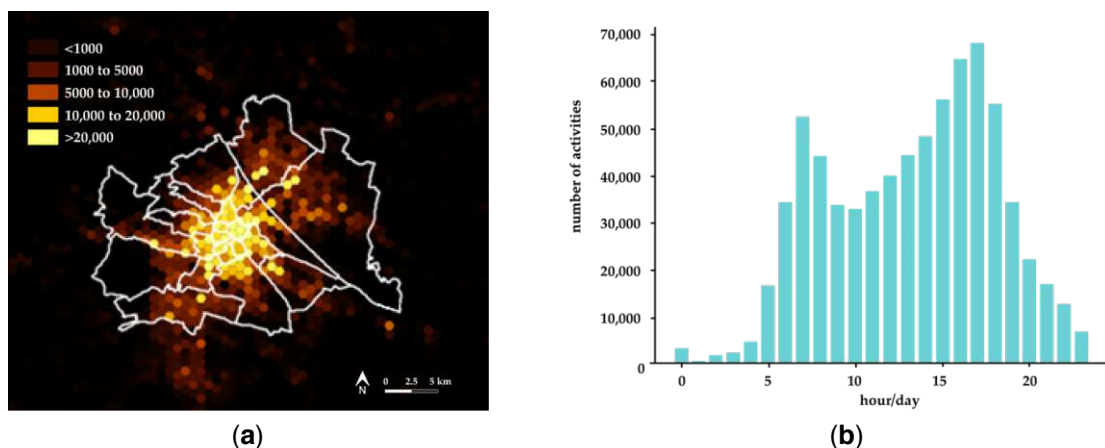


Figure 1. Spatial distribution of activities (a) and number of activities carried out throughout the day (b), based on the mobile phone data [22].

The simulation was modeled for a typical weekday and uses the mobile phone data from a weekday, i.e., Wednesday (representing a typical weekday), in October 2018. The implementation of public transport was based on actual timetables. To reduce calculation time within the simulation, pedestrians and cyclists were not routed based on the existing street network; instead, their travel times and distances were approximated, utilizing Euclidean distance and a detour factor.

The simulation was calibrated based on (a) data from permanently installed traffic counters, i.e., inductions loops and overhead detectors, owned by the city of Vienna and the operator of the Austrian motorways; (b) counting data of public transit passengers from the Vienna public transport authority; and (c) data from the national transport household survey [46].

To model the impacts of AVs on the transport system for the whole city of Vienna, a reference scenario resembling the actual or current mobility within the city and three scenarios with AVs were developed. In the first scenario, SAVs with door-to-door service and in the second scenario, SAVs stopping only at specific stops, i.e., existing bus stops, are implemented as a new means of transport. In the first scenario, agents are picked up by SAVs from one activity location (e.g., home) and brought to the next activity location, while in the second scenario, SAVs transport agents between existing bus stops nearest to their activity locations. Here, the total travel time includes walking time to and from the stop. Within both scenarios, SAVs allow ridesharing, meaning that other agents can get on board or get off from the SAVs along the way. The third scenario focuses on the automation of current private vehicles, i.e., currently existing private vehicles are replaced by private AVs.

It should be mentioned, that the different scenarios—similarly to the scenarios on the transport supply with AVs used in former modeling studies (Section 2)—would strongly need specific policies, e.g., policy changes to incentivize sharing in the case of SAVs, that are not anticipated in the scenarios in detail. Nonetheless, defining specific scenarios and assessing their effects helps to conceptualize the future with AVs and to identify what kind of implementation of AVs and which policies for AVs are necessary in order to reach desirable scenarios [18,47].

To model the SAVs within Scenario 1 (SAVs with door-to-door service) and Scenario 2 (SAVs with a stop-based service) the demand-responsive transport optimization extension for MATSim [48] was used. SAVs are dynamically routed, using an insertion heuristic that aims at minimizing the total taxi workload measured as the total time spent on handling requests [48]. Whenever a new request is submitted, the algorithm searches the routes of all vehicles for optimal insertion. A request from a passenger is accepted if the following criteria are met:

The maximum waiting time a customer is willing to wait for departing (i.e., waiting and boarding), which was assumed—based on former studies [42,49]—to be 10 min, is not exceeded.

The request can be satisfied within the service hours of the SAVs, i.e., between 04:00 and 24:00 h, and the vehicle time window and capacity of vehicles consisting of 10 seats is not exceeded.

The overall time spent on traveling (waiting, boarding and riding) must not exceed the empirically derived time t_r with $t_r = \alpha t_{r,direct} + \beta$, where $t_{r,direct}$ is the direct time between the origin and destination of the request, while α and β are used to model the maximum amount of time loss due to waiting, boarding, i.e., pick-up and drop-off, and possible detours). Time for boarding was assumed to be 45 s.

A request can be rejected only immediately after submission. Once scheduled, the request is guaranteed to be served and cannot be rejected later even if there are some delays while driving that lead to violation of the wait and travel time restrictions above [48].

The starting points of the SAVs, i.e., their distribution at the beginning of the service time, were determined through a temporal–spatial clustering that was based on activity end times. For the clustering, the Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) algorithm [50] was used with a minimum cluster sample of 100 activities and a maximum distance between activities of 250 m. Based on this activity clustering, starting points and number of SAVs were distributed in such a way that the SAVs cover 15% of the cluster's demand.

Within Scenario 3 an automation of all current private vehicles was incorporated, i.e., existing private vehicles were assumed to be automated. This included a utility increase of private AVs in MATSim by 25% due to higher comfort and the possibility to use in-vehicle-time. This reflects assumptions on a reduction of the value of time made in former studies, often varying from –20 to –50% [24,51,52], but also corresponds with the results of stated preference surveys on this topic [36,53,54]. Moreover, the capacity of the whole street network was increased by 40% as AVs—especially with a high penetration rate—enable closer gaps between vehicles and increase capacity. This also corresponds with existing studies in which assumptions on an increase of capacity due to AVs mostly vary between 10 and 80% [20,28,55,56,57].

6.1.3.3. Measuring the Compatibility of AVs in Street Spaces

The method used to measure the compatibility of AVs with other demands of uses and users in the street space builds on the so-called compensatory approach initially developed in the work of [39] and further developed by [11]. For the analysis of the compatibility of AVs with other usage demands in the street spaces, this compensatory approach was adapted and further developed to account for the specific implications and characteristics of AVs.

The compensatory approach assesses the compatibility based on the traffic volume at peak hour and the specific characteristics of the street space and is structured into three analysis steps [11]: First a rough maximum compatible traffic volume, i.e., number of motor vehicles at peak hour, is defined for individual streets sections, based on the area type, nature and extent of buildings, adjacent uses, and the location's function and importance. Since this defined maximum traffic volume may vary depending on various influencing factors, it is adapted based on further characteristics of the street space in a second step. In a third step, the adapted maximum traffic volume at peak hour is compared with the actual traffic volume at peak hour in order to assess the compatibility of the actual traffic volume with the other demands within a street section. All of these steps were carried out by using ArcGIS.

6.1.3.3.1. Determining the Maximum Compatible Traffic Volume

To determine the maximum compatible traffic volume for an individual street section, the area type, the extent and age of buildings, and the adjacent uses were considered. In principle, and based on the studies of [8,11], areas in the city center, i.e., areas with a high density of buildings, shops and businesses, request a higher demand on the qualities of the street space, i.e., higher needs of pedestrians and cyclists (e.g., residents, employees, customers, etc.) to move, stroll, stay, or sit in these street spaces, than residential areas with predominant detached or semidetached buildings or industrial areas, where the density of buildings, shops and businesses is lower, or these are not even present.

To consider these issues and based on [11,39] five different area categories are distinguished for determining the maximum compatible traffic volume of street spaces:

City center/business district: predominant close block development with more than four floors and intensive business use and shops

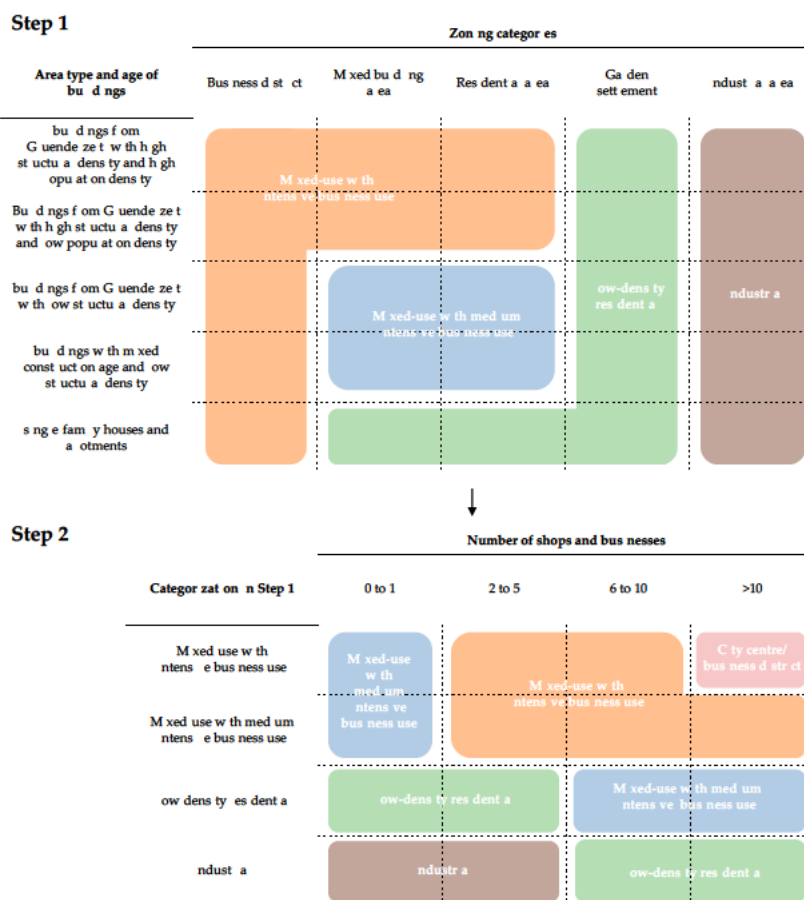
Mixed-use with intensive business use: predominant close block development with more than four floors and medium to intensive business use and shops

Mixed-use with medium intensive business use: predominant close block development with more than four floors or half-open buildings with two to four floors and medium intensive business use and shops

Low-density residential: predominant detached and semidetached buildings and allotments with only occasional shops or other public-intensive uses

Industrial: predominant industrial uses with low demands of residents and no public-intensive uses, such as residential or shopping

In order to categorize the street sections based on the different area categories, in a first step, data on (a) area types and age of buildings and (b) zoning categories were used. In a second step, also data on the number of shops and businesses were used to categorize the whole street network of Vienna in the different categories (Figure 2). Here, data from the city of Vienna, GIP, and Open Street Map were used. Motorways and expressways were assigned to the last category due to their exclusive traffic function. An overview of the categorization of the street network of Vienna according to the different area categories is presented in Appendix A.



period of time in the 19th century; Data: City of Vienna GIP Open Street Map

Figure 2. Overview of steps for categorizing street sections into the different area categories, based on data on area type and age of buildings, zoning categories, and the number of shops and businesses.

Based on authors [11,39], the following maximum compatible traffic volumes, i.e., motor vehicles at peak hour, have been applied for the different area categories (Table 1).

Table 1. Applied maximum compatible traffic volume for different area categories.

Area Category	Compatible Traffic Volume (Vehicles at Peak Hour)
City center/business district	≤20 (well compatible)
	>20–50 (compatible)
	>50–150 (only just compatible)
	>150–400 (not compatible)
	>400 (completely not compatible)
Mixed-use with intensive commercial use	≤50 (well compatible)
	>50–150 (compatible)
	>150–400 (only just compatible)
	>400–600 (not compatible)
Mixed-use with medium intensive commercial use	>600 (completely not compatible)
	≤150 (well compatible)
	>150–400 (compatible)
	>400–600 (only just compatible)
Low-density residential	>600–1000 (not compatible)
	>1000–1200 (not compatible)
	>1200 (completely not compatible)
	≤400 (well compatible)
Industrial	>400–600 (compatible)
	>600–1000 (only just compatible)
	>1000–1200 (only just compatible)
	>1200–1500 (not compatible)
	>1500 (completely not compatible)

6.1.3.3.2. Adapting the Maximum Compatible Traffic Volume Based on Further Characteristics

The categories distinguished in the first step only form a rough categorization. Within the respective categories, however, the design of the street space and their use by pedestrians and cyclists may differ significantly. Therefore, the applied value of the maximum compatible traffic volume based on the area categories is adapted by considering the criteria (a) distribution of space, (b) use by pedestrians and cyclists, (c) speed, (d) heavy-goods vehicle traffic, (e) crossing needs, (f) green and design elements, and (g) crossability. Here, the criterion crossing needs was considered in addition to the initial compensatory approach of authors [11,39]—which only incorporates the other six criteria—to also account for different existing types and intensities of crossing needs (low/punctual, high/linear) in street spaces.

Based on the logic of the compensatory approach, these criteria serve as compensation aspects because of which the level of the compatible traffic volume with the demands of other uses and users in the street spaces may increase or decrease in the magnitude of +100 to –100 vehicles at peak hour [11,39]. The following section describes how the different criteria, i.e., characteristics of the street space, have been considered. Here, Table 2, Table 3 and Table 4 give an overview of how the criteria were assessed. The assessment of the different criteria for the whole street network of Vienna is presented in Appendix B.

Assessment of Criteria

(a) Distribution of space

The criterion distribution of space evaluates the width of areas dedicated for pedestrians and cyclists, i.e., sidewalks, cycle lanes and green strips, in relation to the area dedicated for motor vehicle traffic, i.e., roadway and area for stationary traffic. Based on [11,12], it assumes that the smaller the ratio between the width of the area for pedestrians and cyclists in the street space in comparison to the width of the area for motorized traffic, the less motor vehicle traffic is tolerated. To calculate the ratio, data from the city of Vienna were used. Since there were no data available on the width of bicycle infrastructure on the roadway, the ratio determined was adapted according to the following: If there is a bicycle street within the street section, the ratio was increased by 20%, if there is a cycle lane on the street section, the ratio was increased by 15%, if there is a multi-purpose lane on the street section, the ratio was increased by 10%, and if cycling against the one-way traffic exists on the street section the ratio was increased by 5%. Finally, for the ratio between the width of the area for pedestrians and cyclists and the width of the area for motor vehicle traffic, the compatibility levels shown in Table 2 were determined.

(b) Use by pedestrians and cyclists

The criterion use by pedestrians and cyclists assumes that motor vehicle traffic disturbs or endangers pedestrians and cyclists in their activities in the street space. Therefore, with an increasing number of pedestrians and cyclists that use the street space, motor vehicle traffic is less compatible [12,39]. Data for the number of pedestrians and cyclists within the street space were derived from a Strava heat map, building on different relational categories of the intensity of use by pedestrians and cyclists, as the actual number of pedestrians and cyclists was not explicitly available from Strava (Table 2).

(c) Speed

The criterion speed evaluates the driven speeds at the street section. Based on [11,12], it assumes that traffic speeds have a decisive influence on the usability of the street by residents and the safety of non-motorized road users (e.g., crossability of the road) and that higher speeds driven at the street section make motor vehicle traffic less compatible. For the evaluation, the respective average driven speed at the street sections for the reference scenario and the three scenarios with AVs in MATSim were calculated and the compatibility levels that are shown in Table 2 were implemented.

(d) Heavy goods vehicle traffic

The criterion heavy-goods vehicle traffic evaluates the share of heavy-goods vehicles (HGV) of the total motor vehicle traffic volume. Based on [11,39], it assumes that HGV traffic, in conjunction with an overall low volume of traffic, is a nuisance for residents, particularly due to noise emissions but also concerning traffic safety. Since data on the share of HGV traffic were not available, the HGV share was derived based on the street category and information on residential streets (traffic-calmed sectors with walking speed) and industrial areas as shown in Table 2.

(e) Crossing needs

The criterion crossing needs specifically evaluates the actual crossing needs at the street section. It assumes that the existence of shops, businesses, or other facilities on both sides of

a street, as well as specific places and parks, generate a different intensity of crossing needs. Whereas in shopping streets often high linear crossing needs and at squares, parks and square-like street spaces aerial crossing needs exist, other street spaces only incorporate low punctual crossing needs [12,58]. Based on [12], it is assumed that motor vehicle traffic disturbs the crossing activities and that with increasing intensity of crossing needs, motor vehicle traffic is less compatible. For this criterion, the intensity of crossing needs was derived based on the number of cross-relations between shops, businesses and other facilities, i.e., schools, sport centers, kindergartens, hotels, etc., on both sides of the street section, as well as based on information on shopping streets and squares and (entry points of) parks, based on data from the city of Vienna (Table 2).

Table 2. Compatibility levels for the criteria distribution of space, use by pedestrians and cyclists, speed, heavy-goods vehicle traffic, and crossing needs.

a) Distribution of Space Ratio between Area Width for Pedestrians and Cyclists in Comparison to Area Width for Motor Vehicle Traffic	(b) Use by Pedestrians and Cyclists	(c) Speed Average Speed on the Street Section	(d) Heavy-Goods Vehicle Traffic HGV Share of the Total Motor Vehicle Traffic Volume	(e) Crossing Needs	Categories of Compatibility with Needs of Surrounding Uses and Users	Adaptation of the Maximum Compatible Traffic Volume
≥1 25	very low	≤10 km/h	very low	very low (streets sections with no shops or other facilities)	++ well compatible	+100 vehicles/peak hour
1 00 to <1 25	low	>10 km/h ≤20 km/h	low	low (street sections with at least 1 shop or other facility no cross relations in between)	+ compatible	+50 vehicles/peak hour
0 75 to <1 00	medium	>20 km/h ≤30 km/h	medium	medium (squares and parks or streets sections with 1 or more cross relations between shops or other facilities)	o only just compatible	±0 vehicles/peak hour
0 5 to <0 75	high	>30 km/h ≤40 km/h	high	high (shopping streets)	not compatible	50 vehicles/peak hour
<0 5	very high	>40 km/h	very high	very high (shopping streets or squares and parks with 2 or more cross relations between shops or other facilities)	Completely not compatible	100 vehicles/peak hour

(f) Green and design elements

The criterion green and design elements evaluates the design of the street space with green areas and trees or related design elements. Based on [11,12], the assumption is that fewer green areas and trees or related design elements in the street space reduce the quality of stay and therefore less motorized vehicles are compatible. The evaluation is based on the number of design elements, i.e., street furniture, benches, fountains, etc., as well as trees, bushes, or flowers in the street space, and the compatibility levels that are shown in Table 3 were implemented. Data were obtained from the city of Vienna and Open Street Map.

Table 3. Compatibility levels for the criterion green and design elements.

Number of Design Elements per 100 m	Number of Trees and Bushes per 100 m				
	0	1 to 4	5 to 9	10 to 14	15 or More
0	--	-	-	o	o
1	-	o	o	+	+
2 to 4	o	+	+	++	++
5 or more	+	++	++	++	++

--, very low = completely not compatible (–100 vehicle/peak hour); -, low = not compatible (–50 vehicle/peak hour); o, medium = only just compatible (±0 vehicle/peak hour); +, high = compatible (+50 vehicle/peak hour); ++, very high = well compatible (+100 vehicle/peak hour)

(g) Crossability

The criterion crossability evaluates the number of crossing aids in relation to the length of the street section. Based on [12], it assumes that depending on the previously defined area categories (Section 3.3.1), an appropriate number of crossing aids is necessary to ensure that pedestrians can cross the street easily as possible and without long detours. To obtain the final value for the criterion, the ratio of the number of crossing aids in comparison to the length of the street section is multiplied by 100, whereby, for example, a value of 1.0 means an average distance of 100 m between two crossing aids [12]. Table 4 gives an overview of the respective compatibility levels for each of the predefined area categories. According to [12], it is assumed that pedestrian and encounter zones and residential streets can be crossed everywhere and, therefore, these are well compatible with the needs of the uses and users; for streets with a speed limit of 30 km/h, it is assumed that these can be crossed almost everywhere and that they are, therefore, only just compatible with the needs of the surrounding uses and users. If streets with a speed limit of 30 km/h are additionally equipped with one or more crossing aids, it is assumed that these street sections are compatible with the needs of the surrounding uses and users.

Table 4. Compatibility levels for the criterion crossability.

Area Category	Crossability—Number of Crossing Aids per 100 m																	
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7+
City center/commercial area	--	--	--	--	--	--	--	--	-	-	-	o	o	o	+	+	+	++
Mixed-use with intensive commercial use	--	--	--	--	--	--	-	-	-	o	o	o	+	+	+	++	++	++
Mixed-use with medium intensive commercial use	--	--	--	--	-	-	-	o	o	o	+	+	+	++	++	++	++	++
Low-density residential	--	--	-	-	-	o	o	o	+	+	+	++	++	++	++	++	++	++
Industrial	--	-	-	o	o	o	+	+	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++

--, very low = completely not compatible (–100 vehicle/peak hour); -, low = not compatible (–50 vehicle/peak hour); o, medium = only just compatible (±0 vehicle/peak hour); +, high = compatible (+50 vehicle/peak hour); ++, very high = well compatible (+100 vehicle/peak hour)

Weighting of Criteria

To adapt the maximum compatible traffic volume based on the different criteria, a weighting of the different criteria (rather than using a simple addition) was applied. In general, such

weightings of different criteria are often based on (1) surveys, (2) reviewing the relevance of criteria and weighting in the literature or former studies, or (3) a consultation of decision-makers and experts. We based our weighting on the relevance of the different criteria described in the literature, as well as internal discussions on the importance of the criteria. Current literature especially emphasizes the existence of walking and cycling infrastructure and sufficient space (e.g., width of sidewalks or bike lanes) allocated to pedestrians and cyclists as highly relevant from the perspective of pedestrians and cyclists with regard to the existing motor vehicle traffic—and thus for the assessment of the compatibility of traffic volume with the needs of uses and users within the street space [59,60,61]: In street spaces with only small space allocated to pedestrians and cyclists, considerably less motor vehicle traffic is compatible. Of course, also other criteria like speed, the crossability or the use by pedestrians and cyclists, i.e., the number of pedestrians and cyclists currently using the street space, are important [12,15]. However, an adequate provision of space for pedestrians and cyclists is a key factor. In addition, current claims for a reprioritization of street spaces in favor of transportation modes such as walking and cycling and away from private motorized transport that match the latest calls for a transition to sustainable urban mobility [9,62,63] further prioritize this criterion.

Therefore, a variety of different weights for the criteria have been discussed by using various exemplary images of street spaces in Vienna and comparing the different results regarding the compatibility of the street spaces with the traffic volume in the reference scenario, i.e., comparison of the actual traffic volume in the reference scenario with the different adapted maximum compatible traffic volumes based on the several weightings. Table 5 and Figure 3 give an exemplary overview of this evaluation and exemplary weightings in comparison with equal weighting of criteria. Based on the comparison, the following weighting of criteria was chosen (indicated in bold in Table 5): The criterion distribution of space was weighted highest (weight of 3.5), whereas the weight for the criterion use by pedestrians and cyclists was unchanged and all other criteria were weighted, accordingly, lower. Initially, it was discussed to make the weighting more balanced with only a somewhat higher weight for the criterion distribution of space, leave the criteria use by pedestrians and cyclists, speed, heavy-goods vehicles, and crossability unchanged and apply corresponding lower weights for the criteria green and design elements and crossing needs. However, the comparison of the various weightings for the different street spaces in our view overall showed more plausible results for the weighing described above.

Table 5. Overview of the exemplarily applied weighting of the different criterions.

Criterion	Weighting 1: Equal Weights of Criteria	Weighting 2: Higher Weight for C1, Lower Weight for C5 and C6	Weighting 3: Considerable Higher Weight for C1, Lower Weights for C3 to C7
C1: Distribution of space	1	2	3.5
C2: Use by pedestrians and cyclists	1	1	1
C3: Speed	1	1	0.5
C4: Heavy-goods vehicle traffic	1	1	0.5
C5: Crossing needs	1	0.5	0.5
C6: Green and design elements	1	0.5	0.5
C7: Crossability	1	1	0.5



Mixed-use with intensive commercial use
126 vehicles at peak hour

Compatibility of traffic volume in the street space in reference scenario		
Weighting 1	Weighting 2	Weighting 3
only just compatible	only just compatible	not compatible



Low-density residential
364 vehicles at peak hour

Compatibility of traffic volume in the street space in reference scenario		
Weighting 1	Weighting 2	Weighting 3
compatible	only just compatible	only just compatible



Industrial
798 vehicles at peak hour

Compatibility of traffic volume in the street space in reference scenario		
Weighting 1	Weighting 2	Weighting 3
only just compatible	only just compatible	not compatible

Figure 3. Exemplarily applied weighting and corresponding compatibility of traffic volume in street spaces in the reference scenario. Source for pictures of street spaces: Google Street View.

6.1.3.3.3. Comparison between Actual Traffic Volume and Adapted Maximum Compatible Traffic Volume

After the maximum compatible traffic volume for the respective street sections was adapted by taking into account the different weighted characteristics, it is compared to the actual traffic volume in the street sections. The comparison was conducted for each of the scenarios that were modeled in MATSim, i.e., the reference scenario and the three scenarios with AVs. Based on that, the compatibility of the traffic volume in the scenarios with the other needs of uses and users at the street space was assessed for the whole street network of Vienna. Table 6 gives an example of how the comparison was conducted

Table 6. Example of comparison between actual traffic volume and adapted maximum compatible traffic volume (in number of vehicles at peak hour): assessment of compatibility of a street section.

Section	Maximum Compatible Traffic Volume	Adaptation of Maximum Compatible Traffic Volume							Adapted Maximum Compatible Traffic Volume	Actual Traffic Volume	Assessment of Compatibility	
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7				Total
Street section in area category "mixed-use with intensive commercial use"	150	+175	100	25	50	±0	25	+50	+25	≤75 (++)	157	+ compatible
										>75 b s 175 (+)		
										>175 b s 425 (o)		
										>425 b s 625 (-)		
										>625 (--)		
		weights										
		3.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5				
		unweighted										
		+50	100	50	100	±0	50	+100				

C1 = criterion on desired width of space; C2 = criterion on use by pedestrians and cyclists; C3 = criterion on speed; C4 = criterion on heavy-goods vehicle traffic; C5 = criterion on crossing needs; C6 = criterion on green and design elements; C7 = criterion on crossability

6.1.4. Results

6.1.4.1. Street-Level Changes in Traffic Volume at Peak Hour

As the approach to assess the compatibility of street spaces with AVs builds on changes in traffic volume at peak hour at street level, Figure 4 shows changes in traffic volume, i.e., changes in the number of vehicles at peak hour, for the entire street network of Vienna for Scenario 1 (SAVs with door-to-door service), Scenario 2 (SAVs with stop-based service) and Scenario 3 (private AVs) in comparison to the reference scenario.

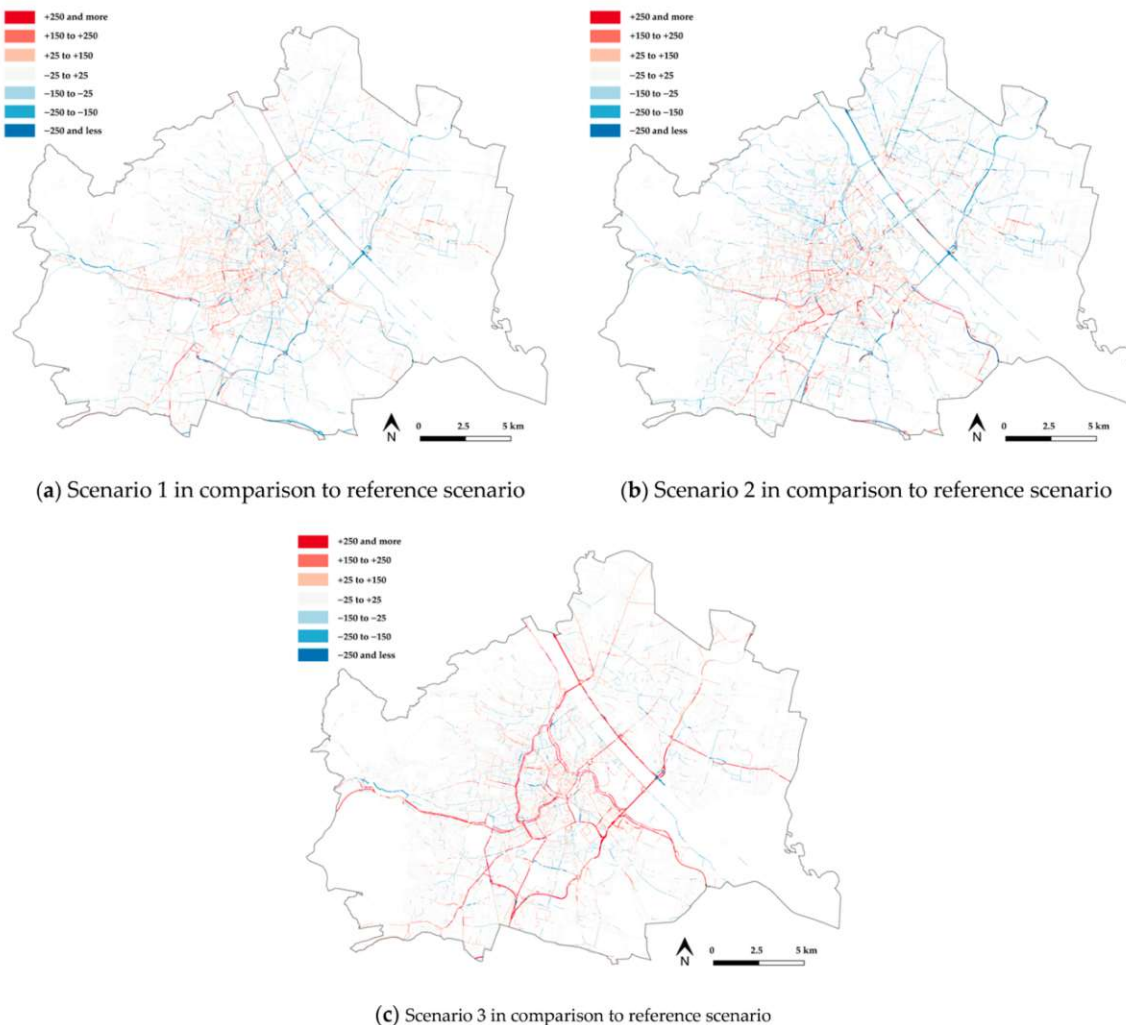


Figure 4. Change of vehicles at peak hour on street level: comparison between (a) Scenario 1, (b) Scenario 2, and (c) Scenario 3 and reference scenario.

For the scenarios with SAVs, the results show an increase of vehicles at peak hour in the inner parts of the city—especially in the lower-level street network. In Scenario 2, the increase is more intense on specific street sections in the inner parts of the city, while Scenario 1 shows an increase in the number of vehicles at peak hour in more street sections, i.e., on a larger scale and even in outer parts of the city (e.g., in the northwest of the city center). However, for Scenario 2, especially on main roads in the outskirts, e.g., northeast of the Danube river, a decrease in the number of vehicles at peak hour is observable.

In contrast, Scenario 3 shows an increase in the number of vehicles at peak hour, especially for the higher-level street network, i.e., motorways, expressways, primary and secondary roads.

6.1.4.2. Assessment of the Compatibility of Street Spaces

Figure 5 gives an overview of the compatibility assessment of street spaces in the reference scenario without AVs and also shows the changes in the assessment of the compatibility between Scenarios 1 to 3 (Section 3.2) and the reference scenario.

For the reference scenario, it is apparent that the current traffic volume, i.e., number of vehicles at peak hour, is compatible in many of the street spaces in the lower-level street network in Vienna—especially in the outskirts. In the higher-level street network (e.g., main roads) and also in several streets in the lower-level street network in the inner parts of the city, the actual traffic volume is mostly not compatible with the needs of the surrounding uses and users, i.e., pedestrians and cyclists.

Looking at the changes between scenarios with AVs, i.e., Scenarios 1 to 3, in comparison to the reference scenario, in line with the aforementioned changes in traffic volume, it is noticeable that all scenarios with AVs show lower levels of compatibility in comparison to the reference scenario, especially in the inner parts of the city. In these inner parts, the compatibility strongly deteriorates especially in Scenario 2 (SAVs with a stop-based service), but also in Scenario 1 (SAVs with door-to-door service). However, Scenario 2 also shows an improvement in compatibility along streets in the outskirts, e.g., in the north-western and northeastern outskirts, as well as in the southeast. In contrast to Scenarios 1 and 2, Scenario 3 (private AVs) also shows a deterioration in compatibility in comparison to the reference scenario southeast of the city center, as well as in the north near motorways and expressways. In inner parts of the city, the deterioration in compatibility is not as intense as in both scenarios with SAVs.

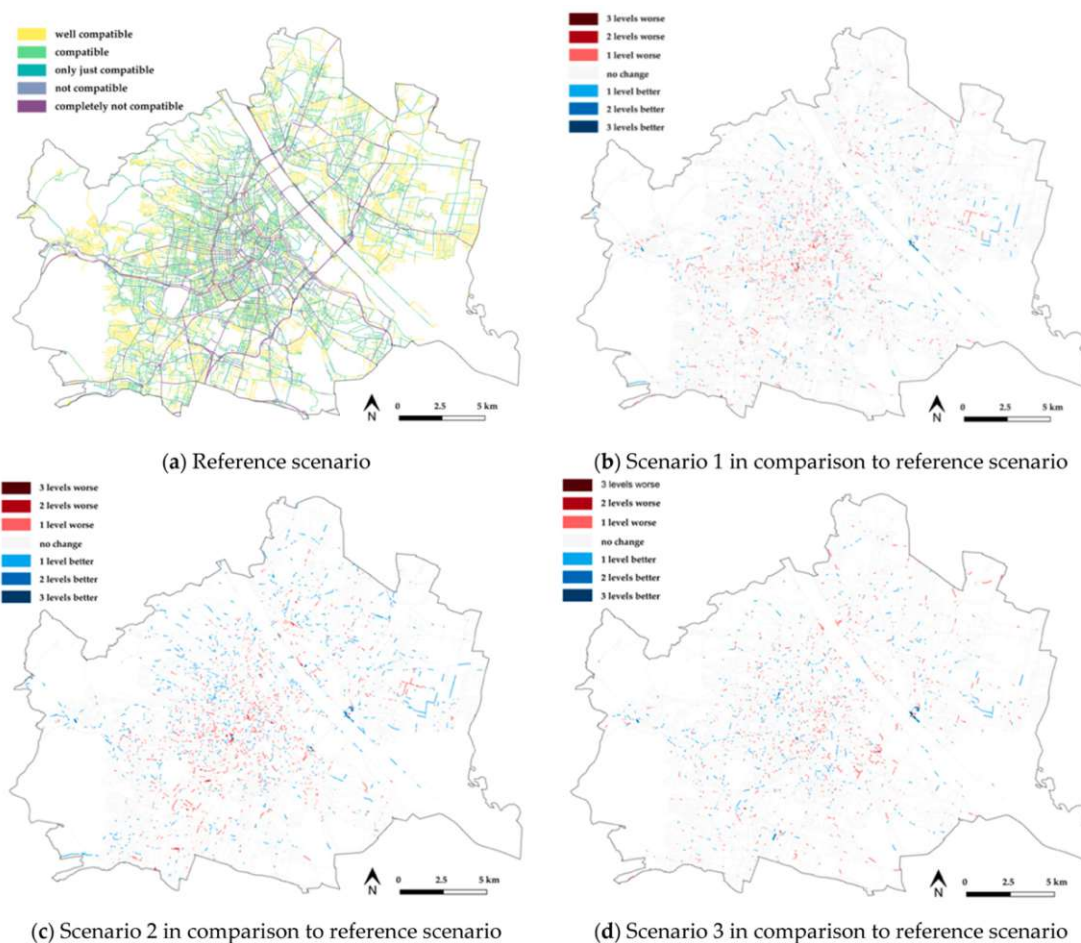


Figure 5. Overview of the assessment of the compatibility in the reference scenario (a), as well as in Scenario 1 (b), Scenario 2 (c) and Scenario 3 (d) in comparison to the reference scenario.

For a more detailed look regarding the change in compatibility between Scenarios 1 to 3 in comparison to the reference scenario, Figure 6 shows changes in traffic volume, i.e., number of vehicles at peak hour, only for those street sections on which traffic volumes were already completely not compatible in the reference scenario. The results for Scenario 1 (SAVs with door-to-door service) and Scenario 2 (SAVs with a stop-based service) show that of the streets which were already completely not compatible before, only those in the central and western part of Vienna experience a high increase in traffic volume, whereas traffic volume for streets in the eastern and southern part (and far western part) of Vienna decreases—to a broader extent in Scenario 2. However, results for Scenario 3 (private AVs) show that traffic volume at peak hour (highly) increases in most of the already completely not compatible streets which leads to an even higher non-compatibility with the needs of uses and other road users in these street sections.

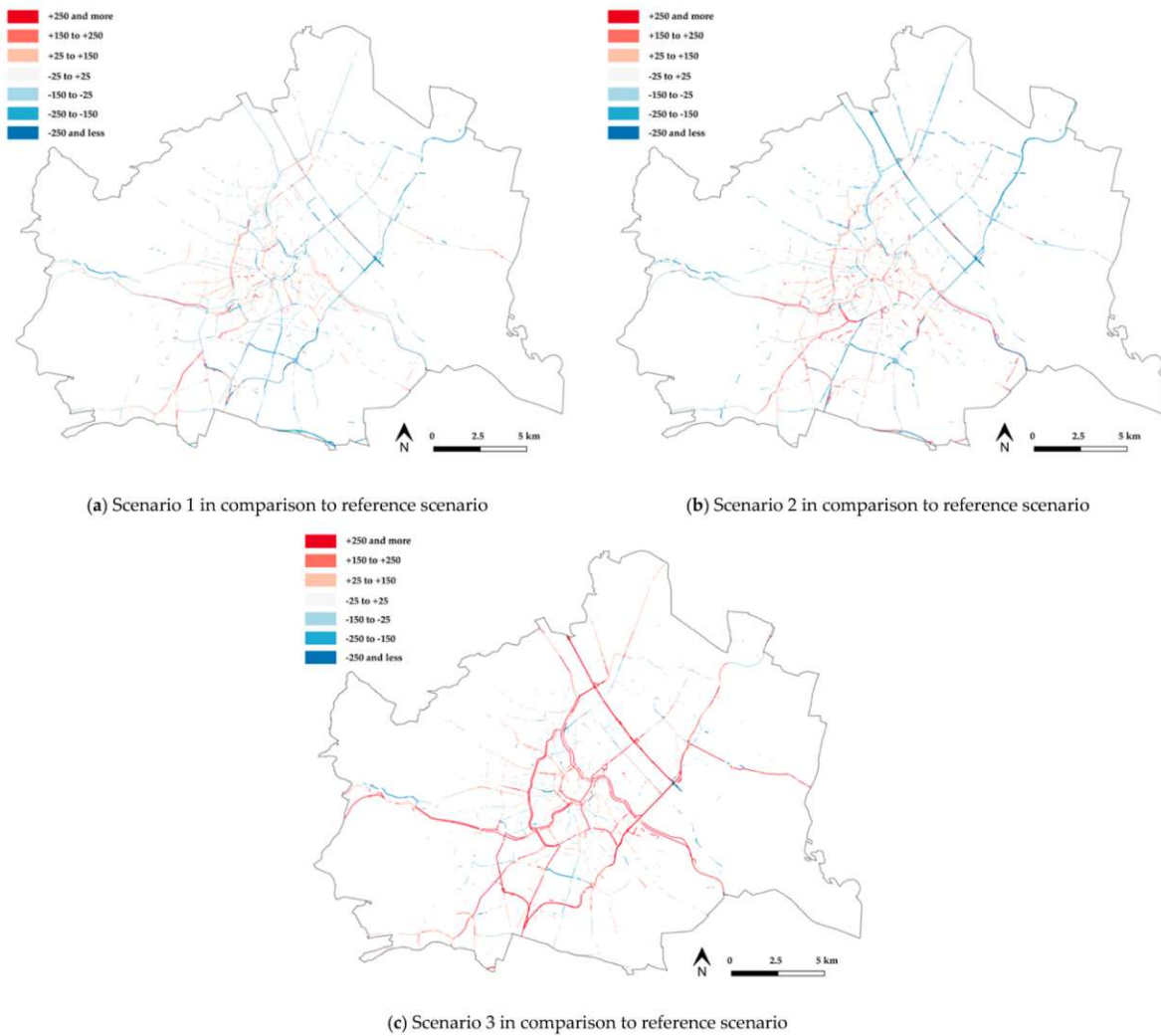


Figure 6. Overview of changes in traffic volume at peak hour at street sections that are completely not compatible in the reference scenario between Scenario 1 (a), Scenario 2 (b) and Scenario 3 (c) and the reference scenario.

6.1.4.3. Sensitivity Analysis

The change in compatibility is not only dependent on the change in traffic volume but also on the applied maximum compatible traffic volume. Therefore, Table 7 shows the share of street sections in different compatibility categories for (a) the actually applied maximum compatible

traffic volume at peak hour, (b) a decrease in the applied maximum compatible traffic volume at peak hour by 10%, and (c) an increase in the applied maximum compatible traffic volume at peak hour by 10% for the reference scenario and the Scenarios 1 to 3.

It is shown that decreasing the applied maximum compatible traffic volume at peak hour (in the different area categories) by 10% increases the share of street spaces in which the traffic volume is completely not compatible in comparison to the actually applied maximum compatible traffic volume at peak hour for the reference scenario and Scenarios 1 to 3. However, when increasing the applied maximum compatible traffic volume at peak hour by 10%, an increase in the share of street spaces with compatible and also well compatible traffic volumes is shown in comparison to the actual applied maximum traffic volume at peak hour for the reference scenario and the Scenarios 1 to 3.

On the other hand, when looking at the share of street sections in different compatibility categories for the reference scenario in comparison to Scenarios 1 to 3, for all the different applied maximum compatible traffic volumes at peak hour, the same directions are shown:

- For Scenario 1 (SAVs with door-to-door service), the share of street spaces with well compatible and compatible traffic volumes decreases in comparison to the reference scenario, while the share of street spaces with only just compatible traffic volumes increases, indicating a shift from street spaces with well compatible and compatible traffic volumes to such with only just compatible traffic. However, on the other hand, the share of street spaces with completely not compatible traffic volumes also decreases in comparison to the reference scenario, indicating likewise an improvement in compatibility.
- Similarly, for Scenario 2 (SAVs with a stop-based service) also mixed effects are shown: On the one hand, an increase in the share of street sections with well compatible traffic volumes, in comparison to the reference scenario, is shown, indicating an improvement in compatibility. On the other hand, a decrease in the share of street spaces with compatible and only just compatible traffic volumes is shown, while the share of street spaces with not compatible traffic volumes increases and the share of street spaces with completely not compatible traffic volumes mainly remains the same, indicating also a deterioration of compatibility for some street sections.
- For Scenario 3 (private AVs), however, the share of street spaces with well compatible traffic volumes decreases (and the share of street spaces with (only just) compatible traffic increases), while also the share of street spaces with completely not compatible traffic volumes increases (and the share of street spaces with not compatible traffic decreases)—indicating both a shift of street spaces with well compatible traffic volumes to street spaces with compatible traffic and a shift from street spaces with not compatible traffic volumes to street spaces with completely not compatible traffic, i.e., an overall decrease in compatibility.

Table 7. Overview of the share of street sections in different compatibility categories for different applied maximum compatible traffic volumes in reference scenario and Scenarios 1 to 3 (n = 52,840).

Scenario	Assessment of Street Sections	Applied Maximum Compatible Traffic Volume at Peak Hour		
		10% Decrease	Actually Applied	10% Increase
Reference Scenario	we compatible	29.6%	32.8%	36.1%
	compatible	33.1%	34.0%	34.3%
	only just compatible	14.3%	12.5%	10.9%
	not compatible	8.0%	7.1%	6.5%
	completely not compatible	15.0%	13.6%	12.1%
Scenario 1	we compatible	29.2%	32.7%	36.0%
	compatible	33.0%	33.8%	34.2%
	only just compatible	14.9%	13.0%	11.2%
	not compatible	7.9%	7.1%	6.6%
	completely not compatible	15.0%	13.4%	11.9%
Scenario 2	we compatible	30.2%	33.7%	36.8%
	compatible	32.9%	33.4%	33.8%
	only just compatible	13.8%	12.1%	10.6%
	not compatible	8.1%	7.3%	6.7%
	completely not compatible	15.0%	13.5%	12.1%
Scenario 3	we compatible	29.4%	32.7%	36.0%
	compatible	33.2%	34.0%	34.3%
	only just compatible	14.3%	12.7%	11.0%
	not compatible	7.9%	6.6%	6.3%
	completely not compatible	15.2%	13.8%	12.4%
		100.0%	100.0%	100.0%

6.1.4.4. Sensibility of the Compatibility with Increased Traffic in Street Spaces and Interlinking with the Technical-Infrastructural Suitability of Street Spaces for AVs

For further investigation, Figure 7 shows the sensibility of the compatibility with additional traffic in street spaces, i.e., the possible increase in the number of vehicles at peak hour before traffic volumes become completely not compatible.

It is observable that traffic volumes in the higher-level street network—especially main roads in the city center—are already completely not compatible and therefore, any increase in vehicles would further increase non-compatibility. Moreover, also for streets in the lower-level street network in the inner parts of the city, only a minor traffic increase would be possible as these street sections already have a high traffic volume in comparison to the needs of surrounding uses and users. However, some areas in the outskirts seem less sensible to additional traffic, i.e., higher levels of additional traffic would be possible before compatibility would decrease, since current traffic volume in these street sections is very low and the needs of surrounding uses and users are lower than in the inner parts of the city.

Besides the compatibility of AVs within street spaces or the sensibility of the compatibility in street spaces to additional traffic due to AVs, also the existing conditions and configurations of street spaces are important in order to assess whether the implementation of AVs may be suitable. The latter could lead to a different complexity for the functional operation of Automated Driving Systems (ADSs) and thus differentiate regarding their technical–infrastructural suitability for AVs. Soteropoulos et al. [64] developed an index to assess the technical–infrastructural suitability of street spaces for the functional operation of AVs, i.e., the

automated drivability, and applied this concept by using the case study of the city of Vienna. Overlapping both this assessment of the automated drivability, as well as the assessment on the sensibility of the compatibility in street spaces, with regard to additional traffic at peak hour (Figure 7), street sections can be observed where (1) AVs could be deployed without (major) adjustments and relatively soon from a technical–infrastructural perspective and, likewise, (2) an expected increase in traffic volume due to AVs would be less problematic regarding the needs of surrounding uses and users, i.e., pedestrians and cyclists.



Figure 7. Possible increase of number of vehicles at peak hour until completely not compatible in the reference scenario.

Figure 8 shows the overlap of these assessments for the whole street network of Vienna. It is well noticeable that most streets in the city center, i.e., in particular main roads (with high speeds and adjacent business use) but also streets in the lower-level street network, (shown in pink) have a low automated drivability and likewise permit only a low increase of additional vehicles until they become completely not compatible. However, some street sections in the outskirts (shown in dark green) are also characterized by a higher automated drivability and likewise permit an increase of vehicles before they become completely not compatible, i.e., in particular streets in industrial areas with low speeds and a low number of pedestrians and cyclists.



Figure 8. Overlap of the assessment of the sensibility of compatibility with increased traffic (in the reference scenario) and the assessment of the automated drivability.

6.1.5. Discussion

The implementation of AVs will be a relevant topic for cities, transport, and city planning in the near future. The results presented in this paper are a first investigation of the extent to which the implementation and use of AVs and related changes in traffic volume are compatible with the needs of pedestrians and cyclists within different street spaces. Such an assessment could help cities to implement AVs in a more sustainable way also considering the needs of pedestrians and cyclists and recognizing not only the traffic function of street spaces but also their function as spaces for people to meet, stay, sit, or play.

The results for the city of Vienna show that changes in traffic volume, i.e., number of vehicles at peak hour, with AVs are unevenly distributed in all scenarios investigated. Putting these changes in traffic volume at peak hour in relation to the different characteristics of street spaces, i.e., land use along the street (surrounding uses) and the needs of users within these street spaces, to assess the compatibility of AVs, further showed diverse results.

For SAVs, increases in traffic volume are observable especially in street sections (in the lower-level street network) in inner parts of the city. These results correspond very much with the results of References [22,27] who also report an increase in traffic volume due to SAVs with ridesharing especially in the lower-level street network in inner-city areas.

Based on the compatibility assessment of these increases in traffic volume with the needs of uses and users in inner-city streets spaces, this also leads to a (strong) deterioration of

compatibility due to a high sensibility regarding additional traffic in these street spaces, as it competes with numerous other uses: Especially in areas with intensive business use, there is a wider range of usage demands, due to pedestrian and bicycle traffic, cross-traffic, restaurants, and leisure activities of neighboring residents within the street spaces. Here, for SAVs with a stop-based service, several streets in inner parts experienced a higher increase in traffic volume, also leading to stronger deterioration in compatibility, in comparison to SAVs with door-to-door service.

However, while for SAVs with a door-to-door service increases in traffic volume are observable also in some of the outer parts of the city of Vienna, SAVs with a stop-based service could also reduce traffic volume at peak hour in some streets—especially at main roads—in the outskirts. This also corresponds very much with the results of References [22,27] that both indicate a reduction in traffic volume for SAVs with ridesharing, especially on main roads. However, both studies report these effects for SAVs with door-to-door service.

These decreases in traffic volume on main roads—according to the compatibility assessment—also lead to improvements in compatibility, i.e., reducing the separating effects of such streets.

In the scenario with SAVs with a stop-based service, passengers can only get on and off at existing bus stops and therefore increases in traffic volume are bundled. Especially in inner parts of the city where the density of bus stops is very high and no long walks to use the SAVs have to be done. Here, high increases in traffic volume are bundled at street sections near bus stops which in addition to high usage demands also lead to a stronger deterioration in compatibility. On the other hand, such a service seems to be an alternative to private cars in the outskirts but still, it bundles more users at specific stops and therefore could reduce traffic volume especially on main roads in the outskirts to an extent that could also improve the compatibility of such streets.

In contrast, SAVs with a door-to-door service also lead to an increased traffic volume in some areas in the outskirts, as SAVs with a door to door service seem to be more convenient than SAVs stopping only at existing bus stops in these areas. After all, bus stops are less dense in these areas and longer walks would be necessary in order to use SAVs. Therefore, SAVs with a door-to-door service are used in these areas, instead of public transport vehicles or to access public transport stops, e.g., subway stations, instead of walking to them. However, the overall increases in traffic volume in street spaces in the outskirts (that at the same time are characterized by lower usage demands), but especially in inner parts are more distributed over the street network. Therefore, they are not so intense for specific street sections (in comparison to a more bundled increase in traffic volume for SAVs with a stop-based service), leading to a less intense deterioration of compatibility.

Results for private AVs, for which changes in traffic volumes at the street level have not been investigated in detail in former studies, show increases in traffic volume at peak hour mostly on streets that were already not compatible in the reference scenario. This leads to an even higher non-compatibility with demands of other road users in these street sections. Here, it seems that the increase in the overall capacity of the street network by 40% and the increase in utility by 25% of AVs leads to the circumstance that more people are using AVs and that these are used especially in the higher-level street network as speeds are innately higher as in the lower-level street network and the increase in capacity heightens average speeds (and reduces congestion) and the reliability of higher speeds for more vehicles. Therefore, especially higher-ranked streets which were already a barrier in the city become an even stronger barrier.

When taking into account not only the compatibility of street spaces but also the technical–infrastructural suitability of AVs, it is shown that especially areas in the outskirts such as industrial areas or low-density residential areas seem to have a low sensibility for further traffic (as the number of vehicles in these street sections are very low and also the needs of surrounding uses and users are lower than in some of the inner parts of the city) and are also more suitable from a technical–infrastructural view. Given the results of the different scenarios with AVs, in particular at these street sections or in these areas a dedicated implementation of AVs, especially as a stop-based SAV service, could be interesting for cities.

However, although the assessment of the compatibility, using the compensatory approach, gives first insights, the assessment is only a coarse investigation of the compatibility of AVs in different street spaces and has several limitations.

The applied compensatory approach gives a height weight to the factor of traffic volume at peak hour which is a relevant factor and through which the density of (and gaps between) vehicles can be indirectly taken into account. Thus, a coarse assessment regarding the compatibility of AVs in street spaces can be made with the help of this approach. However, other aspects of AVs within the streets spaces, e.g., stopping SAVs at street spaces for picking up or dropping off passengers, that could further increase the separating or barrier effect of the streets, i.e., decreasing the permeability of the street spaces, or specific aspects of traffic flow and impacts on pedestrians and cyclists have to be investigated on a more detailed level, for example, by using microscopic traffic flow simulation (e.g., Verkehr In Städten—SIMulationsmodell (VISSIM)) in specific streets (in addition to MATSim), to have a more detailed analysis on the impact of AVs on the barrier effect.

Moreover, although values of the maximum compatible traffic volume were derived from the literature, and also a sensitivity analysis was conducted, clearly results on the compatibility heavily rely on the values of the maximum compatible traffic volume and the defined area categories. Furthermore, the adaptation of these values, using different characteristics, as well as their weighting, plays an important role. Although all of these aspects rely on existing literature and were also discussed with stakeholders from the city of Vienna regarding plausibility, more emphasis has to be put on these issues and they need to be investigated further. This also includes a consideration of linkages between the different specific characteristics of the street space, e.g., speed and crossability, and a more specific differentiation between different areas categories and street spaces or taking into account further empirical findings on the perception of the characteristics in their weighting [65]. Moreover, some of the data needed for the approach were not available in a detailed enough manner, e.g., data on the number of pedestrians and cyclists or also micro-mobility users and the share of HGV traffic (e.g., from transportation models or micro-mobility providers) were not available; instead, an approximation of data for the specific characteristics of the street space was used.

Beyond that, it should also be mentioned that the different scenarios that built the basis for the modeling and the assessment of the compatibility could only show coarse directions of impacts with AVs for a longer time horizon as they assume an operation of AVs in the whole city of Vienna. Moreover, they would also incorporate specific policies resulting in such scenarios that were not anticipated for the modeling in detail. As described before (when mentioning the technological–infrastructural suitability of street spaces for AVs) and by taking into account latest developments, it becomes clear that AVs will likely roll out in waves or only in specific areas in the near future and the mentioned changes in traffic volume will initially occur in these areas [64,66]. However, to put the implementation of this rollout into some kind of a strategy

from the viewpoint of cities, an understanding of possible changes in traffic volume with regard to different scenarios and their respective assumptions but also considering how this impairs the needs of other roads users in the street space is important to conceptualize the future with AVs [18,47]. Not least in order to identify or set policies to accompany the implementation of AVs in certain areas that would prevent undesirable effects, i.e., impairing the needs of pedestrians and cyclists, from a city perspective.

Lastly, of course, the travel patterns and activities used as input data for the simulation could also change in the future, as especially the COVID-19 pandemic fostered developments regarding working from home, i.e., fewer trips to work, and has also negatively affected public transit usage and ridesharing. For public transport and ridesharing, it might take some time to reach the same levels of usage as before the pandemic [67,68].

All of these aspects, but also other future developments, have to be taken into account when putting the results into context, as these might affect the validity of the modeling results.

6.1.6. Conclusions and Recommendations for Further Research

This paper investigated to what extent the implementation and use of AVs are compatible with the needs of surrounding uses and users, i.e., pedestrians and cyclists, in street spaces. Based on different scenarios with AVs in MATSim and the associated changes in traffic volume, i.e., number of vehicles at peak hour, and considering the different characteristics of streets and respective user demands, compatibility in different street spaces was assessed for the whole street network of Vienna.

For SAVs, results indicate a deterioration in compatibility especially in inner-city dense areas because of an increase in traffic volume and an already high amount of competing uses. In contrast, especially (on main roads) in the outskirts improvements in compatibility are observable. This particularly applies to SAVs with a stop-based service, while for SAVs with a door-to-door service this effect is only observable to a lower extent. However, private AVs interlinked with an overall capacity increase would lead to a deterioration in compatibility especially in streets with already not compatible traffic volumes in the higher-level street network, further increasing the separating or barrier effect of such streets.

Overall, the analysis can help city and transport planning to evaluate how to implement AVs in a sustainable way without increasing barrier effects of streets for pedestrians and cyclists further. It not only gives an overview of possible changes in traffic volume at street level for different scenarios with AVs, but also enables an indication to what extent these changes in traffic volume impair the needs of use and users in different street spaces. Moreover, it calls for taking the specific characteristics of street spaces into account when considering the implementation of AVs in the future. This also gives hints how and (helps to identify) in which areas an implementation of AVs should be facilitated and where the implementation of AVs should be connected to policies and measures to improve compatibility of traffic with the needs of pedestrians and cyclists.

However, although such an assessment of the compatibility has not been conducted before, with regard to changes in traffic volume due to AVs, the assessment using the compensatory approach is only a coarse investigation of the compatibility of AVs in different street spaces. More emphasis has to be put in future research to focus in a more detailed manner on the changes of traffic volume of AVs at the street level and how this might affect other roads users and differs based on various characteristics of street spaces. Here, future studies modeling

the impacts of AVs that build the basis for such an assessment should also take into account current technological developments of AVs and look at traffic changes due to AVs in specific areas, as AVs will roll out in waves and possibly first in specific areas of a city [66].

Moreover, the approach to assess to what extent changes in traffic volume at street level impair pedestrians and cyclist should be developed further in future research. This concerns the incorporation of other aspects that seem important with regard to this topic, such as waiting times at traffic lights or results of the examination of actual traffic interactions between pedestrians and cyclists with AVs [69,70,71,72]. Additionally, other objective indicators regarding compatibility should be looked at, e.g., a low compatibility means also increased stress for pedestrians and cyclists that could be detected and mapped, using sensors [73] or further assessment of the (visual) quality of street space to meet, stay, sit, or play, using machine learning and other approaches [8,74], to assess the compatibility of AVs (and also develop possible implementing strategies) on a broader basis [15], is important.

In this regard, also a much broader assessment of the compatibility of AVs with the needs of uses and users might be necessary in the future. For example, also privacy issues due to the cameras, sensors, and lidars that are monitoring the environment of AVs and thus also pedestrians and cyclists in the street spaces, might be needed to consider for the implementation of AVs.

Overall, however, the analyses for Vienna give first insights into this topic for the scale of a whole street network and call for differentiated implementation strategies for AVs that consider the different characteristics of street spaces throughout a city.

Particularly in areas in the outskirts where sensibility towards a further increase of vehicles due to AVs is lower and conflicts less with other needs of uses and users than in the inner parts of the city, implementing SAVs in addition to public transport may decrease traffic volumes in these areas and thus be interesting for cities to consider. All the more so from a technical–infrastructural side, since these areas seem to be less complex environments for AVs in comparison to the crowded streets and intersections in the inner areas of cities. However, as mentioned as part of the scenario description, this would also need accompanying measures, e.g., to increase sharing.

In contrast, street spaces in which the current traffic volume at peak hour is already not compatible with the usage demands and especially in inner-city areas where AVs could induce traffic volumes, should be designed to be more compatible with the needs of pedestrians and cyclists (moving, crossing and leisure activities like eating, sitting, or playing in the street space), e.g., by implementing walking and cycling infrastructure, speed reduction, or additional crossing aids, etc., or the implementation of AVs should be linked to these measures. Here, especially the conversion of parking spaces in favor of such design elements and space for pedestrians and cyclists seems important and could be become an appropriate and (more accepted) measure with regard to future concepts with AVs, as parking needs—especially in the case of SAVs—could be reduced [6,75,76]. For future work, it would be interesting to evaluate the effects of potential planning measures or policies, such as pedestrianization, creation of public spaces, or restrictions of AVs, in street spaces that are already completely not compatible and look at how their situation changes within the assessment of compatibility. However, since an increase in traffic volume at peak hour is observable at least in some street sections in all of the scenarios with AVs, measures to reduce the increase in traffic volume due to AVs such as dynamic mobility pricing or measures to increase the occupancy rate (e.g., bans or charges for empty rides [77]) could also be useful. In addition, a lot of cars are already connected and with AVs connectivity will further increase in the future. At the same time most

cities today put efforts to foster the concept of the smart city, installing traffic sensors or parking detectors or implementing systems (e.g., smart parking systems) with Internet of Things (IoT) capabilities [78,79]. Moreover, AVs will be equipped with internet and communication capabilities as part of IoT, ensuring communication and exchanging information between the vehicles (V2V), but also with the infrastructure (V2I) and with smartphones of pedestrians (V2P) and cyclists [78,80]. This could enable real-time control, operation and traffic management of AVs in cities which could also help to reduce the increase in traffic volume or at least balance traffic and reduce congestion [78].

Finally, regarding the implementation of AVs—even when considering SAVs to complement public transport—it should be carefully evaluated whether they are compatible with the needs of pedestrians and cyclists, as infrastructural adjustments might be necessary [81,82] that could decrease the permeability of the street space. Doing so is particularly crucial during the transition phase, when maturity of technology is still low.

6.1.7. Appendix

Appendix A. Categorization of Areas for the Maximum Compatible Traffic Volume

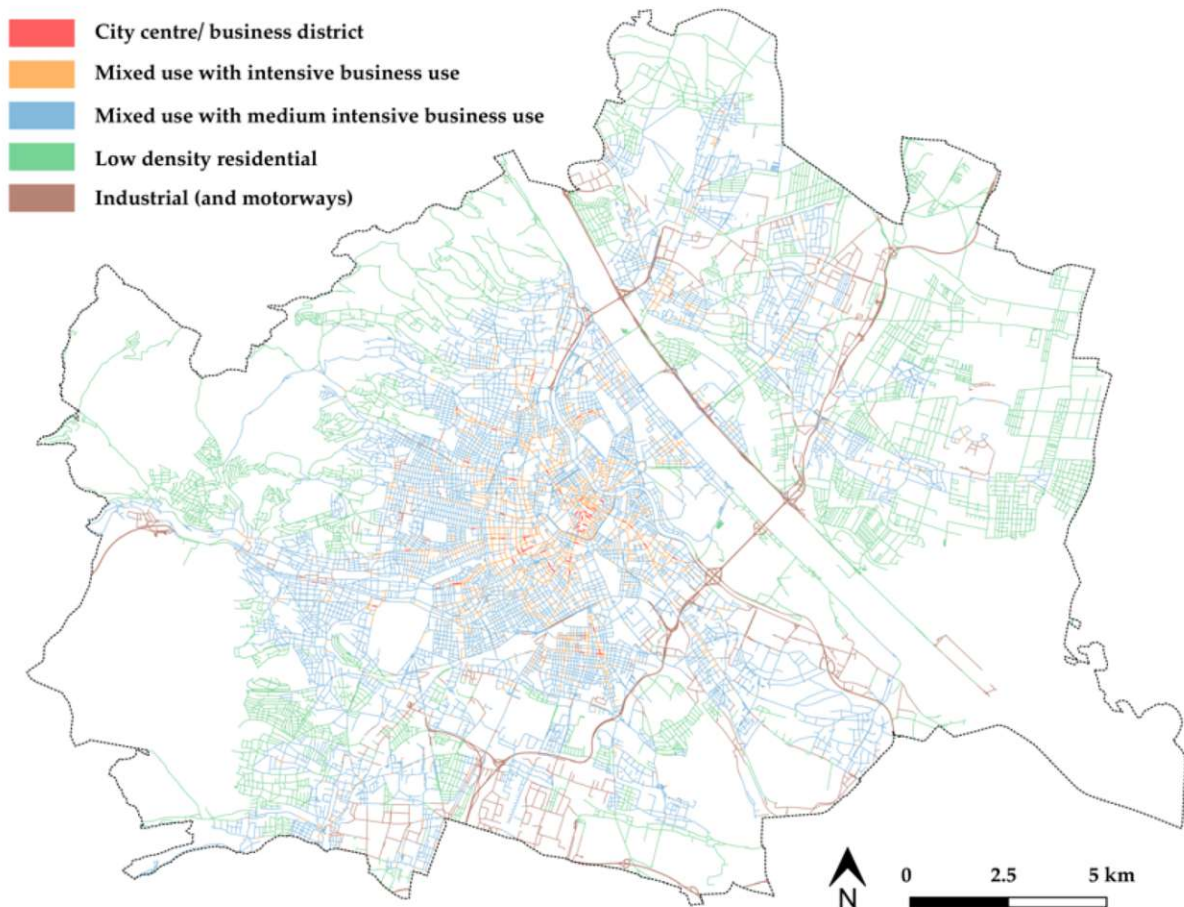
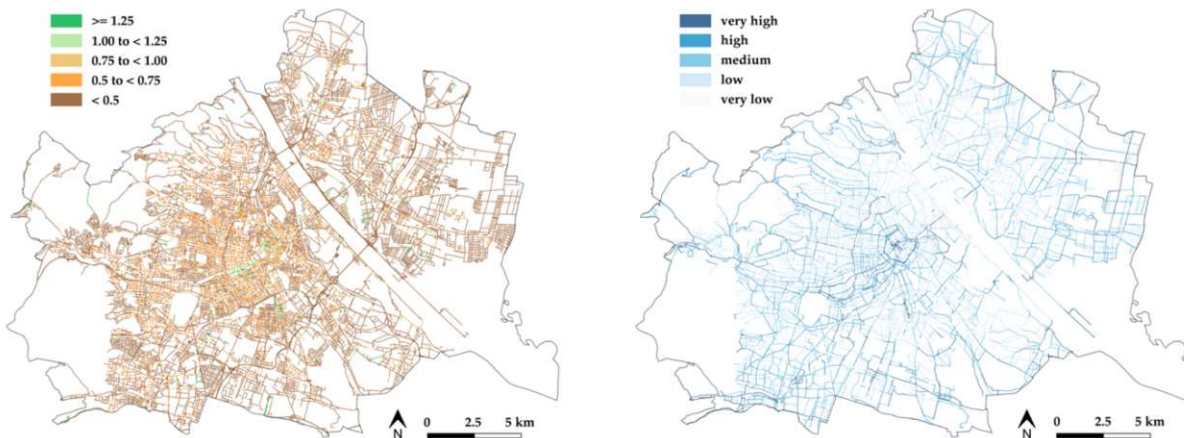


Figure A1. Categorization of street sections in the different area categories for the maximum compatible traffic volume for Table 2. Overview of the different criteria for adapting the maximum compatible traffic volume.

Appendix B. Criteria for Adapting the Maximum Compatible Traffic Volume



(a) Distribution of space

(b) Use by pedestrians and cyclists

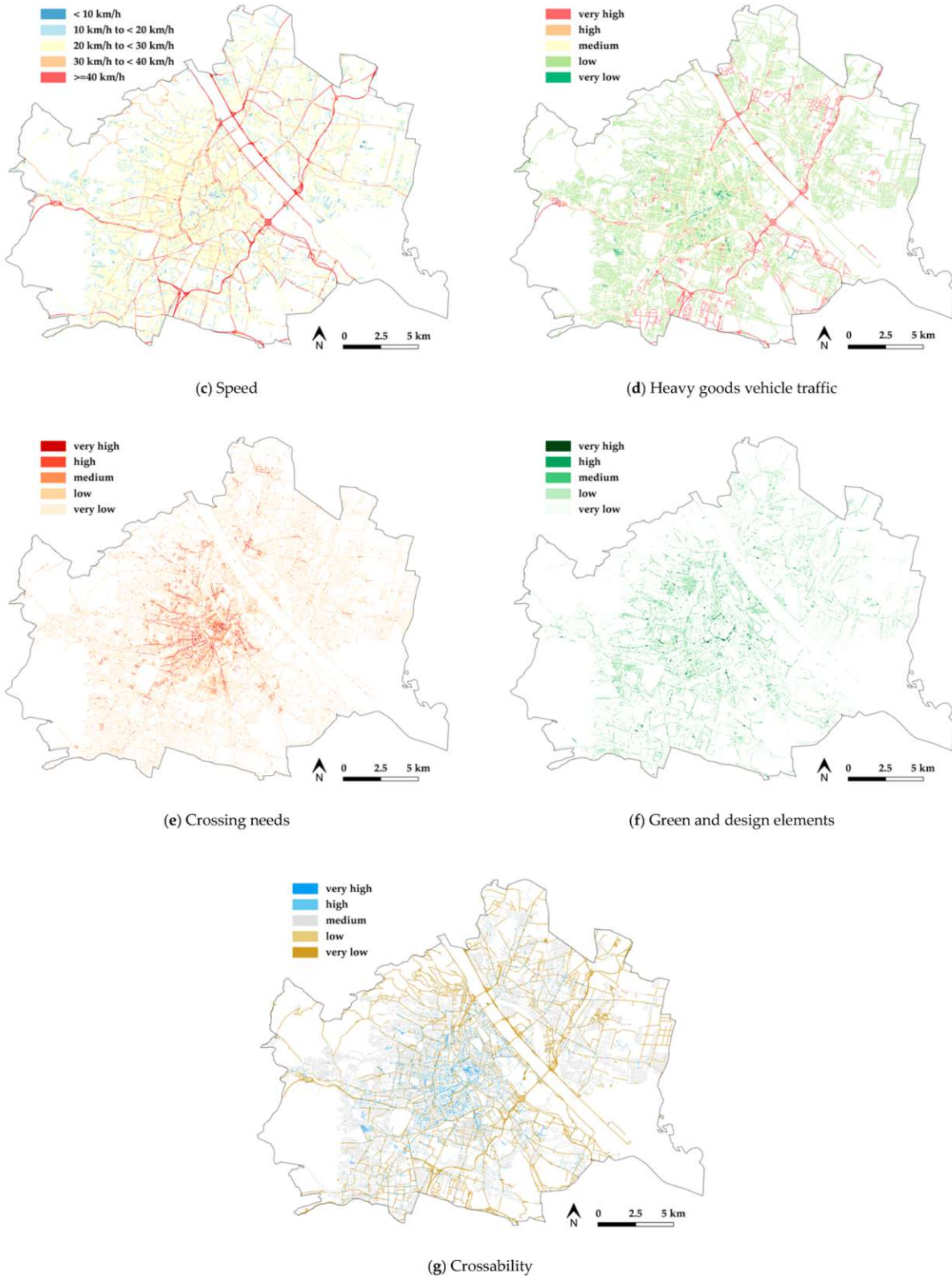


Figure A2. Overview of the different criteria for adapting the maximum compatible traffic volume: (a) Distribution of space (ratio between area width for pedestrians and cyclists in comparison to area width for motorized traffic); (b) Use by pedestrians and cyclists; (c) Speed (average speed of motor vehicles in reference scenario); (d) Heavy goods vehicle traffic (share of heavy goods traffic of the total motor vehicle traffic volume); (e) Crossing needs; (f) Green and design elements (number of trees, bushes and design elements); (g) Crossability

6.1.8. References

1. González-González, E.; Nogués, S.; Stead, D. Automated vehicles and the city of tomorrow: A backcasting approach. *Cities* **2019**, *94*, 153–160.
2. Gavanas, N. Autonomous Road Vehicles: Challenges for Urban Planning in European Cities. *Urban Sci.* **2019**, *3*, 61.
3. Staricco, L.; Rappazzo, V.; Scudellari, J.; Brovarone, E.V. Toward Policies to Manage the Impacts of Autonomous Vehicles on the City: A Visioning Exercise. *Sustainability* **2019**, *11*, 5222.
4. Pernestål, A.; Engholm, A.; Kristoffersson, I.; Hammes, J.J. The impacts of automated vehicles on the transport system and how to create policies that target sustainable development goals. In *Shaping Smart Mobility Futures: Governance and Policy Instruments in Times of Sustainability Transitions*; Paulsson, A., Sørensen, C.H., Eds.; Emerald: Bingley, UK, 2020; pp. 37–53.
5. Milakis, D.; van Arem, B.; van Wee, B. Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *J. Intell. Transp. Syst.* **2017**, *21*, 324–348.
6. Soteropoulos, A.; Berger, M.; Ciari, F. Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: An international review of modelling studies. *Transp. Rev.* **2019**, *39*, 29–49.
7. Hörl, S.; Becker, F.; Dubernet, T.; Axhausen, K.W. *Induzierter Verkehr Durch Autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung*; Bundesamt für Strassen: Bern, Switzerland, 2019.
8. Gehl Architects, *Downtown Seattle: Public Spaces & Public Life*. City of Seattle. 2009. Available online: www.seattle.gov/Documents/Departments/SDCI/Codes/PublicSpacesLifeIntro.pdf (accessed on 4 January 2021).
9. Bertolini, L. From “streets for traffic” to “streets for people”: Can street experiments transform urban mobility? *Transp. Rev.* **2020**, *40*, 734–753.
10. FGSV—Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. *Directives for the Design of Urban Roads*; RAS 06 2012; FGSV—Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Cologne, Germany, 2012.
11. Bühlmann, F.; Laube, M. *Verträglichkeit Straßenraum; Methodik und Ergebnisse*; Zurich, Switzerland, 2013.
12. Häfliger, R.; Bubenhofer, J.; Hagedorn, C.; Zweibrücken, K.; Condrau, S.; Baier, R. *Verträglichkeitskriterien für Straßenraum innerorts*; Bundesamt für Strassen: Bern, Switzerland, 2015.
13. Jensen, S.U. Pedestrian and Bicyclist Level of Service on Roadway Segments. *Transp. Res. Rec.* **2007**, *2031*, 43–51.
14. Parkin, J.; Clark, B.; Clayton, W.; Ricci, M.; Parkhurst, G. *Understanding Interactions between Autonomous Vehicles and Other Road Users. A Literature Review*. Project Report. University of the West of England, Bristol. Available online: <http://eprints.uwe.ac.uk/29153> (accessed on 15 January 2021).
15. Ancaes, P.R.; Jones, P.; Mindell, J.S. Community Severance: Where Is It Found and at What Cost? *Transp. Rev.* **2016**, *36*, 293–317.
16. Abegg, C.; Girod, C.; Fischer, K.; Pahud, N.; Raymann, L.; Perret, F. *Einsatz Automatisierter Fahrzeuge im Alltag—Denkbare Anwendungen und Effekte in der*

Schweiz. Schlussbericht Modul 3d Städte und Agglomerationen. 2018. Available online: www.ebp.ch/sites/default/files/project/uploads/2018-08-30%20aFn_3d%20St%C3%A4dte-Agglomerationen%20Schlussbericht_1.pdf (accessed on 1 October 2020).

17. Heinrichs, D. Autonomous driving and urban land use. In *Autonomous Driving*; Maurer, M., Gerdes, C.J., Lenz, B., Winner, H., Eds.; Springer: Heidelberg, Germany, 2016; pp. 213–231.
18. Curtis, C.; McLeod, S.; Hultén, J.; Pettersson-Lofstedt, F.; Paulsson, A.; Hedegaard Sørensen, C. Knowledge for policy-making in times of uncertainty: The case of autonomous vehicle model results. *Transp. Rev.* **2020**, 1–21.
19. Zhao, Y.; Kockelman, K.M. Anticipating the regional impacts of connected and automated vehicle travel in Austin, Texas. *J. Urban Plan. Dev.* **2018**, 144, 04018032.
20. Childress, S.; Nichols, B.; Charlton, B.; Coe, S. Using an activity-based model to explore the potential impacts of automated vehicles. *Transp. Res. Rec.* **2015**, 2493, 99–106.
21. Zhang, W.; Guhathakurta, S.; Khalil, E.B. The impact of private autonomous vehicles on vehicle ownership and unoccupied VMT generation. *Transp. Res. Part C* **2018**, 90, 156–165.
22. International Transport Forum. *Urban Mobility System Upgrade-How Shared Self-Driving Cars Could Change City Traffic*; International Transport Forum: Paris, France, 2015.
23. Liu, J.; Kockelman, K.M.; Boesch, P.M.; Ciari, F. Tracking a system of shared autonomous vehicles across the Austin, Texas network using agent-based simulation. *Transportation* **2017**, 44, 1261–1278.
24. Boesch, P.M.; Ciari, F.; Axhausen, K.W. Transport policy optimization with autonomous vehicles. *Transp. Res. Rec.* **2018**, 2672, 698–707.
25. Oh, S.; Seshadri, R.; Azevedo, C.L.; Kumar, N.; Basak, K.; Ben-Akiva, M. Assessing the impacts of automated mobility-on-demand through agent-based simulation: A study of Singapore. *Transp. Res. Part A* **2020**, 138, 367–388.
26. Fagnant, D.J.; Kockelman, K.M.; Bansal, P. Operations of shared autonomous vehicle fleet for Austin, Texas, market. *Transp. Res. Rec.* **2015**, 2563, 98–106.
27. Friedrich, M.; Hartl, M. *MEGAFON-Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs*; University of Stuttgart: Stuttgart, Germany, 2016.
28. Auld, J.; Sokolov, V.; Stephens, T.S. Analysis of the effects of connected-automated vehicle technologies on travel demand. *Transp. Res. Rec.* **2017**, 2625, 1–8.
29. Kim, K.; Rousseau, G.; Freedman, J.; Nicholson, J. The Travel Impact of Autonomous Vehicles In Metro Atlanta through Activity-Based Modeling. In *Proceedings of the 15th TRB National Transportation Planning Applications Conference*, Atlantic City, NJ, USA, 17–21 May 2015.
30. Martinez, L.M.; Viegas, J.M. Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. *Int. J. Transp. Sci. Technol.* **2017**, 6, 13–27.
31. Spieser, K.; Treleaven, K.; Zhang, R.; Frazzoli, E.; Morton, D.; Pavone, M. Toward a systemic approach to the design and evaluation of automated mobility-on-demand systems: A case study in Singapore. In *Road Vehicle Automation. Lecture Notes in Mobility*; Meyer, G., Beiker, S., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2014; pp. 229–245.
32. Zhang, W. *The Interaction between Land Use and Transportation in the Era of Shared Autonomous Vehicles: A Simulation Model*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2017.

33. Zambrano-Martinez, J.L.; Calafate, C.T.; Soler, D.; Lemus-Zúñiga, L.G.; Cano, J.C.; Manzoni, P.; Gayraud, T. A centralized route-management solution for autonomous vehicles in urban areas. *Electronics* **2019**, *8*, 722.
34. Rossi, F.; Zhang, R.; Hindy, Y.; Pavone, M. Routing autonomous vehicles in congested transportation networks: Structural properties and coordination algorithms. *Auton. Robot.* **2018**, *42*, 1427–1442.
35. Horni, A.; Nagel, K.; Axhausen, K.W. *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*; Ubiquity: London, UK, 2016.
36. Harb, M.; Stathopoulos, A.; Shiftan, Y.; Walker, J.L. What do we (Not) know about our future with automated vehicles? *Transp. Res. Part C* **2021**, *123*, 102948.
37. Frehn, M.; Steinberg, G.; Schröder, S. Methodik und Ergebnisse der Straßenraumverträglichkeit. Verkehrsentwicklungsplan Bremen 2025. 2013. Available online: http://www.bau.bremen.de/sixcms/media.php/13/130228_E03_Strassenraumvertraeglichkeit_Methodik_Ergebnisse.pdf (accessed on 12 February 2021).
38. Baier, R.; Hebel, C.; Jachtmann, Y.; Reinartz, A.; Schäfer, K.H.; Warnecke, A. Stadt Mönchengladbach. Untersuchungen zur Verkehrsentwicklungsplan 2011, BSV—Büro für Stadt- und Verkehrsplanung Reinhold Baier, Aachen. Available online: <https://tinyurl.com/yaqvgpwk> (accessed on 13 February 2021).
39. Von Mörner, J.; Müller, B.; Topp, H. Entwurf und Gestaltung innerörtlicher Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Bericht 425; Bundesministerium für Verkehr: Bonn, Germany, 1984.
40. Graph Integration Platform—GIP. The Reference System of Austrian Public Authorities for Transport Infrastructure Data. Available online: <http://gip.gv.at/en/index.html> (accessed on 11 February 2021).
41. Su, S.; Zhou, H.; Xu, M.; Ru, H.; Wang, W.; Weng, M. Auditing street walkability and associated social inequalities for planning implications. *J. Transp. Geogr.* **2019**, *74*, 62–76.
42. Boesch, P.M.; Ciari, F.; Axhausen, K.W. Autonomous Vehicle Fleet Sizes Required to Serve Different Levels of Demand. *Transp. Res. Rec.* **2016**, *2542*, 111–119.
43. Trafility, Wiener Linien, Wiener Lokalbahnen, TU Graz. In *auto.Waves: Autonomes Fahren—Wirkungsanalyse Verkehr, Energie und Stadt für den Raum Wien*; Research Report; Institute of Highway Engineering and Transport Planning, Vienna City Administration, Urban Planning Department: Vienna, Austria, 2020.
44. Kickhofer, B.; Hosse, D.; Turnera, K.; Tirachini, A. Creating an Open MATSim Scenario from Open Data: The Case of Santiago de Chile; TU Berlin, Transport System Planning and Transport Telematics: Berlin, Germany, 2016.
45. Hörl, S.; Balac, M.; Axhausen, K.W. A first look at bridging discrete choice modeling and agent-based microsimulation in MATSim. *Procedia Comput. Sci.* **2018**, *130*, 900–907.
46. Tomschy, R.; Herry, M.; Sammer, G.; Klementsitz, R.; Riegler, S.; Follmer, R.; Gruschwitz, D.; Josef, F.; Gensasz, S.; Kirnbauer, R.; et al. Österreich unterwegs 2013/2014: Ergebnisbericht zur österreichweiten Mobilitätserhebung “Österreich unterwegs 2013/2014”; Bundesministerium für Verkehr, Infrastruktur und Technologie: Vienna, Austria, 2016.
47. Brovarone, E.V.; Scudellari, J.; Staricco, L. Planning the transition to autonomous driving: A policy pathway towards urban liveability. *Cities* **2021**, *108*, 102996.

48. Bischoff, J.; Maciejewski, M.; Nagel, K. City-Wide Shared Taxis: A Simulation Study in Berlin. In Proceedings of the IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Yokohama, Japan, 16–19 October 2017; pp. 275–280.
49. Levin, M.W.; Kockelman, K.M.; Boyles, S.D.; Li, T. A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application. *Computers. Environ. Urban Syst.* **2017**, *64*, 373–383.
50. Ester, M.; Kriegel, H.-P.; Sander, J.; Xu, X. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. In Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Portland, ME, USA, 2–4 August 1996; pp. 226–231.
51. Gelauff, G.; Ossokina, I.; Teulings, C. Spatial Effects of Automated Driving: Dispersion, Concentration or Both; KIM–Netherlands Institute for Transport Policy Analysis: The Hague, The Netherlands, 2017.
52. Auld, J.; Verbas, O.; Javanmardi, M.; Rousseau, A. Impact of privately-owned level 4 CAV technologies on travel demand and energy. *Procedia Comput. Sci.* **2018**, *130*, 914–919.
53. de Correia, G.H.; Loeff, E.; van Cranenburgh, S.; Snelder, M.; van Arem, B. On the impact of vehicle automation on the value of travel time while performing work and leisure activities in a car: Theoretical insights and results from a stated preference survey. *Transp. Res. Part A* **2019**, *119*, 359–382.
54. Kolarova, V.; Steck, F.; Bahamonde-Birke, F.J. Assessing the effect of autonomous driving on value of travel time savings: A comparison between current and future preferences. *Transp. Res. Part A* **2019**, *129*, 155–169.
55. Friedrich, B. The effect of autonomous vehicles on traffic. In *Autonomous Driving*; Maurer, M., Gerdes, C.J., Lenz, B., Winner, H., Eds.; Springer: Heidelberg, Germany, 2016; pp. 317–334.
56. Meyer, J.; Becker, H.; Bösch, P.M.; Axhausen, K.W. Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities? *Res. Transp. Econ.* **2017**, *62*, 80–91.
57. Gucwa, M. Mobility and Energy Impacts of Automated Cars. In Proceedings of the Automated Vehicles Symposium, San Francisco, CA, USA, 15–17 July 2014.
58. Ghielmetti, M.; Steiner, R.; Leitner, J.; Hackenfort, M.; Diener, S.; Topp, H. *Flächiges Queren in Ortszentren—Langfristige Wirkung und Zweckmäßigkeit*; Bundesamt für Straßen: Bern, Switzerland, 2017.
59. Gössling, S. Why cities need to take road space from cars-and how this could be done. *J. Urban Des.* **2020**, *25*, 443–448.
60. Arellana, J.; Saltarín, M.; Larrañaga, A.M.; González, V.I.; Henao, C.A. Developing an urban bikeability index for different types of cyclists as a tool to prioritise bicycle infrastructure investments. *Transp. Res. Part A* **2020**, *139*, 310–334.
61. Moura, F.; Cambra, P.; Gonçalves, A.B. Measuring walkability for distinct pedestrian groups with a participatory assessment method: A case study in Lisbon. *Landsc. Urban Plan.* **2017**, *157*, 282–296.
62. Holden, E.; Gilpin, G.; Banister, D. Sustainable mobility at thirty. *Sustainability* **2019**, *11*, 1965.
63. Nello-Deakin, S. Is there such a thing as a ‘fair’ distribution of road space? *J. Urban Des.* **2019**, *24*, 698–714.

64. Soteropoulos, A.; Mitteregger, M.; Berger, M.; Zwirchmayr, J. Automated Drivability: Toward an assessment of the spatial deployment of level 4 automated vehicles. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2020**, *136*, 64–84.
65. Ancaes, P.R.; Jones, P. How Do Pedestrians Balance Safety, Walking Time, and the Utility of Crossing the Road? A Stated Preference Study; *Street Mobility and Network Accessibility Series; Working Paper 08*; University College London: London, UK, 2016; Available online: https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1505652/1/Ancaes_ucl_streetmobility_paper08.pdf (accessed on 10 January 2021).
66. Axhausen, K.W.; Livingston, C.; Hörl, S.; Bruns, F.; Fischer, R.; Tasnády, B. Auswirkungen des Automatisierten Fahrens; Teilprojekt 2; Verkehrliche Auswirkungen und Infrastrukturbedarf; ASTRA—Bundesamt für Strassen: Bern, Switzerland, 2020.
67. Tirachini, A.; Cats, O. COVID-19 and public transportation: Current assessment, prospects, and research needs. *J. Public Transp.* **2020**, *22*, 1.
68. Beck, M.J.; Hensher, D.A.; Wei, E. Slowly coming out of COVID-19 restrictions in Australia: Implications for working from home and commuting trips by car and public transport. *J. Transp. Geogr.* **2020**, *88*, 102846.
69. Schieben, A.; Wilbrink, M.; Kettwich, C.; Madigan, R.; Louw, T.; Merat, N. Designing the interaction of automated vehicles with other traffic participants: Design considerations based on human needs and expectations. *Cogn. Technol. Work* **2019**, *21*, 69–85.
70. Merat, N.; Mun Lee, Y.; Markkula, G.; Uttley, J.; Camara, F.; Fox, C.; Dietrich, A.; Weber, F.; Schieben, A. How do we study pedestrian interaction with automated vehicles? Preliminary findings from the European interACT project. In *AVS 2019: Road Vehicle Automation 6*; Meyer, G., Beiker, S., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 21–33.
71. Woodman, R.; Lu, K.; Higgins, M.D.; Brewerton, S.; Jennings, P.A.; Birrell, S. Gap acceptance study of pedestrians crossing between platooning autonomous vehicles in a virtual environment. *Transp. Res. Part F* **2019**, *67*, 1–14.
72. Pyrialakou, D.V.; Gkartzonikas, C.; Gatlin, J.D.; Gkritza, K. Perceptions of safety on a shared road: Driving, cycling, or walking near an autonomous vehicle. *J. Saf. Res.* **2020**, *72*, 249–258.
73. Kyriakou, K.; Resch, B.; Sagl, G.; Petutschnig, A.; Werner, C.; Niederseer, D.; Liedlgruber, M.; Wilhelm, F.H.; Osborne, T.; Pykett, J. Detecting moments of stress from measurements of wearable physiological sensors. *Sensors* **2019**, *19*, 3805.
74. Ye, Y.; Zeng, W.; Shen, Q.; Zhang, X.; Lu, Y. The visual quality of streets: A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images. *Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci.* **2019**, *46*, 1439–1457.
75. González-González, E.; Nogués, S.; Stead, D. Parking futures: Preparing European cities for the advent of automated vehicles. *Land Use Policy* **2020**, *91*, 104010.
76. Zhang, W.; Guhathakurta, S.; Fang, J. Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach. *Sustain. Cities Soc.* **2015**, *19*, 34–45.
77. Boesch, P.M. *Autonomous Vehicles—The Next Revolution in Mobility*. Ph.D. Thesis, ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 2020.
78. Seuou, P.; Banissi, E.; Ubakanma, G. The Future of Mobility with Connected and Autonomous Vehicles in Smart Cities. In *Digital Twin Technologies and Smart Cities*;

Farsi, M., Daneshkhah, A., Hosseinian-Far, A., Jahankhani, H., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 37–52.

79. Mohammadi, F.; Nazri, G.A.; Saif, M. A Real-Time Cloud-Based Intelligent Car Parking System for Smart Cities. In Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP), Weihei, China, 28–30 September 2019; pp. 235–240.
80. Shladover, S.E. Connected and automated vehicle systems: Introduction and overview. *J. Transp. Syst.* **2018**, *22*, 190–200.
81. International Transport Forum. Cooperative Mobility Systems and Automated Driving. Summary and Conclusion; OECD: Paris, France, 2020; Available online: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/cooperative-mobility-systems-automated-driving-roundtable-summary.pdf> (accessed on 5 January 2021).
82. Botello, B.; Buehler, R.; Hankey, S.; Mondschein, A.; Jiang, Z. Planning for walking and cycling in an autonomous-vehicle future. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.* **2019**, *1*, 100012.

7. Zusammenfassung und Diskussion der zentralen Erkenntnisse

Ziel dieser Arbeit war es zunächst eine umfassende Perspektive darauf zu geben, welche verkehrlichen und räumlichen Wirkungen mit (voll-)automatisierten Fahrzeugen zu erwarten sind und wie diese Wirkungen sowie ihre Ausprägungen mit unterschiedlichen Einflussgrößen zusammenhängen bzw. von unterschiedlichen Einflussgrößen abhängen (Kapitel 4). Darüber hinaus beleuchtete die Arbeit in diesem Kontext die spezifische Relevanz der Ebene des Straßenraums, die in vorhandenen Studien zu möglichen verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge bislang nur unzureichend berücksichtigt wurde. Hierbei zielte die Arbeit einerseits darauf ab, aufzuzeigen, wie die technologischen Komponenten bzw. die Funktionsweise eines automatisierten Fahrzeuges und die räumliche Umgebung zusammenwirken, in welcher Form also bestimmte Straßenräume aus technisch-infrastruktureller Sicht für automatisiertes Fahren geeignet oder weniger geeignet sind (Kapitel 5). Letztlich ging es dabei auch darum abzuschätzen, in welchen Straßenräumen automatisierte Fahrzeuge vor dem Hintergrund deren unterschiedlicher technisch-infrastruktureller Eignung zeitlich eher bzw. später eingesetzt werden können. Andererseits strebte die Arbeit – unter Berücksichtigung der Heterogenität von Straßenräumen – an, zu untersuchen, wie ein möglichst verträglicher Einsatz von automatisierten Fahrzeugen fernab möglicher negativer Wirkungen hinsichtlich Verkehrsleistung, insbesondere für andere VerkehrsteilnehmerInnen im Straßenraum erreicht werden könnte (Kapitel 6). Hierbei ging es darum zu untersuchen, in welchen Straßenräumen die mit automatisierten Fahrzeugen assoziierten Wirkungen wie eine Zunahme der Verkehrsleistung und eine Erhöhung der Trennwirkung durch eine dichtere Fahrzeugfolge eher mit den Ansprüchen der NutzerInnen und Umfeldnutzungen verträglich sind und in welchen nicht (Abbildung 11). In diesem Kapitel werden die zentralen Erkenntnisse der Arbeit bzw. aus den vorherigen Kapiteln zu den unterschiedlichen Themenkomplexen zusammengefasst und diskutiert. In Kapitel 8 werden die zentralen Ergebnisse der Arbeit nochmals umfassend reflektiert.

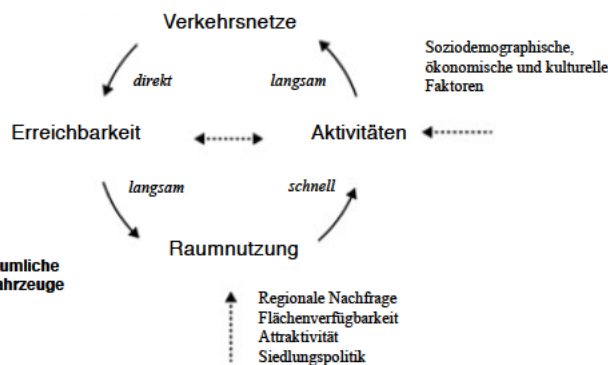
Artikel 2: Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge (Kapitel 5)

Technisch-infrastrukturelle Eignung des Straßenraums für automatisierte Fahrzeuge

Automatisierte Fahrzeuge
Infrastrukturinvestitionen
Planung und Mobilitätspolitik

Artikel 3: Straßenräumliche Verträglichkeit unter Berücksichtigung der verkehrlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge (Kapitel 6)

Straßenräumliche Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen



Artikel 1: Verkehrliche und räumliche Wirkungen automatisierter Fahrzeuge (Kapitel 4)

Abbildung 11: Überblick über die Artikel und darin behandelten Themenkomplexe und deren Einordnung und Verknüpfung im Wirkunggefüge von Raumnutzung und Verkehr, Quelle: eigene Darstellung aufbauend auf Bertolini 2017

Themenkomplex 1: Welche verkehrlichen und räumlichen Wirkungen sind durch automatisierte Fahrzeuge zu erwarten?

Die Ergebnisse des systematischen Literaturreviews von Modellierungsstudien (Kapitel 4) machen deutlich, dass mit dem Einsatz automatisierter Fahrzeuge umfangreiche verkehrliche und räumliche Auswirkungen zu erwarten sind. Verkehrliche Wirkungen automatisierter Fahrzeuge werden dabei hinsichtlich einer Veränderung der Verkehrsleistung, d.h. gefahrene Fahrzeugkilometer, sowie bezüglich des Modal-Split, d.h. dem Anteil unterschiedlicher Verkehrsmittel an der gesamten Verkehrsnachfrage (Wege oder Kilometer), angeführt. Räumliche Wirkungen automatisierter Fahrzeuge werden in Bezug auf eine Veränderung der Anzahl benötigter Parkplätze bzw. der Anzahl benötigter Fahrzeuge für die Abwicklung der Verkehrsnachfrage sowie bezüglich einer veränderten Standortwahl von Personen und Betrieben beschrieben (Abbildungen 12 und 13).

Mit Hinblick auf die Wirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf die Verkehrsleistung wird deutlich, dass private automatisierte Fahrzeuge überwiegend mit einer Zunahme der gefahrenen Kilometer aufgrund von Verlagerungen von anderen Verkehrsmodi einhergehen. Hierbei bewegt sich die Zunahme der Verkehrsleistung bei Annahme einer hohen Reduktion beim Value of Time³ (Zeitwahrnehmung und -bewertung) sowie von Parkkosten und hohen Marktanteilen von automatisierten Fahrzeugen im Bereich von 15 % bis 59 %. Auch mit Sharing verbundene automatisierte Fahrzeuge führen aufgrund von Verlagerungen von anderen Verkehrsmodi sowie Leerfahrten überwiegend zu einer Zunahme der gefahrenen Kilometer. Diese Zunahme liegt zwischen 35 % und 60 % bei der Annahme einer Reduktion beim Value of Time und geringen Kosten für die Nutzung sowie zwischen 8% und 89%, wenn angenommen wird, dass ein Teil oder die gesamte Verkehrsnachfrage im motorisierten Individualverkehr durch automatisierte Fahrzeuge verbunden mit Sharing abgewickelt wird. Ein Rückgang der Verkehrsleistung im Ausmaß von 10 % bis 25 % zeigt sich allein bei der Annahme eines hohen Anteils von Ride-Sharing.

Bezüglich des Modal Split zeigt sich, dass private automatisierte Fahrzeuge überwiegend zu einer Reduktion des Anteils des Öffentlichen Verkehrs sowie des Fahrrads und des Zufußgehens am Modal Split führen, wobei hohe Reduktionen insbesondere bei der Annahme eines hohen Rückgangs beim Value of Time sowie bei Park- und Betriebskosten ersichtlich sind. Auch automatisierte Fahrzeuge verbunden mit Sharing führen überwiegend zu einem Rückgang des Anteils des Öffentlichen Verkehrs sowie des Fahrrads und des Zufußgehens am Modal Split, insbesondere wenn hohe Reduktionen beim Value of Time und geringe Kosten für die Nutzung angenommen werden. Zunahmen beim Anteil des Öffentlichen Verkehrs, des Fahrrads und des Zufußgehens am Modal Split zeigen sich allein bei der Annahme von eher hohen Kosten für die Nutzung und keinem Vorhandensein von privaten Fahrzeugen.

³ Der Begriff „Value of Time“ oder im Deutschen „Zeitwert“ beschreibt eine Kennzahl, die den monetären Wert einer frei nutzbaren Stunde für eine Person wiedergibt. Im Sinne einer Zeitbewertung bildet die Kennzahl die Zahlungsbereitschaft einer Person oder Personengruppe für eine Fahrzeiteinsparung mit einem Verkehrsmittel ab (vgl. Gruber et al. 2018:14, Axhausen et al. 2016). Im Zusammenhang mit automatisierten Fahrzeugen ergibt sich eine Veränderung des Zeitwertes unter anderem durch eine Erhöhung des Komforts durch die Möglichkeit einer anderwärtigen Nutzung der Fahrzeit (siehe auch Kapitel 2.2.2) (vgl. Gruber et al. 2018: 68).

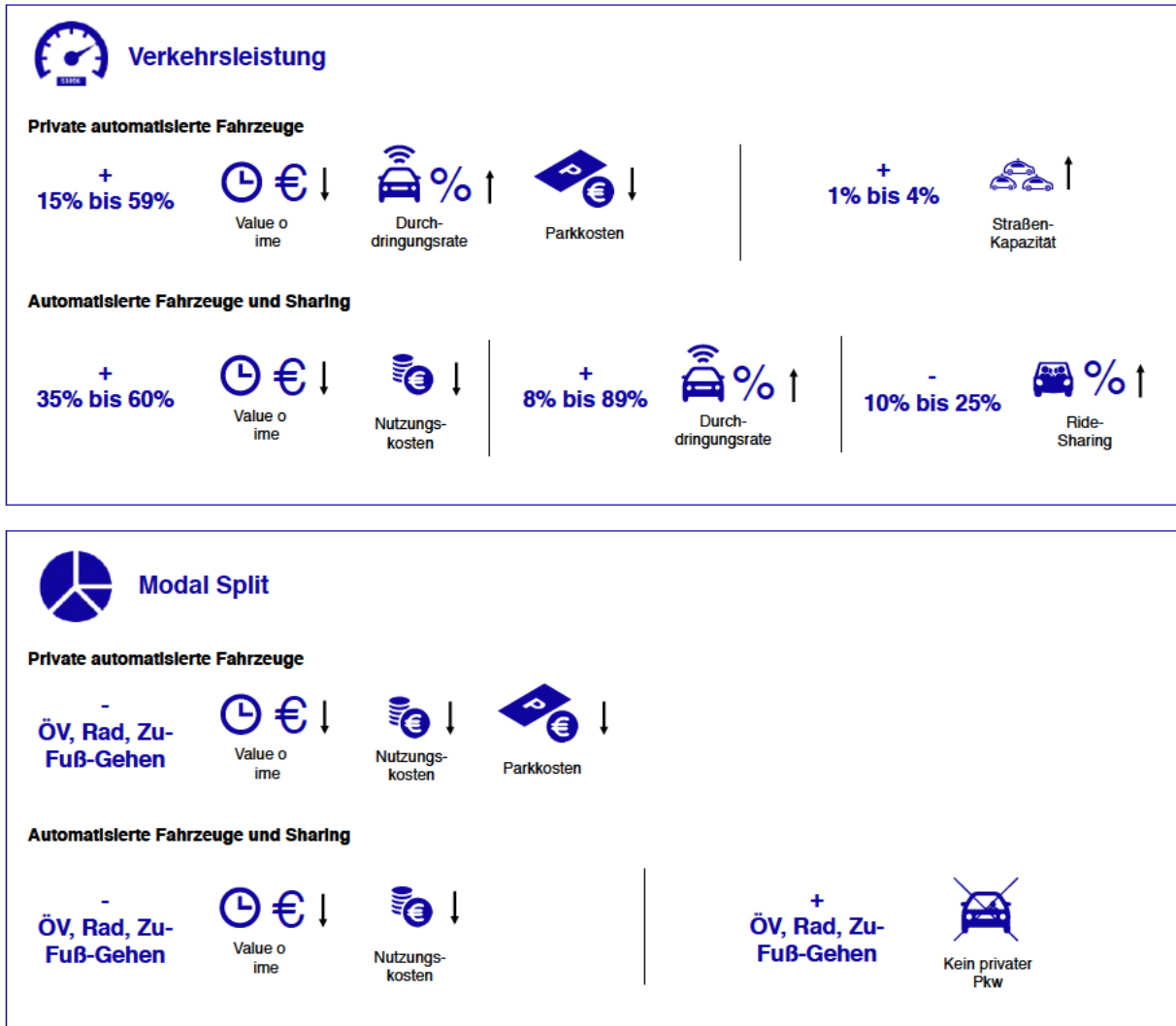


Abbildung 12: Überblick über die Spannweiten der Wirkungen automatisierter Fahrzeuge auf die Verkehrsleistung und den Modal Split und Bezug zu Annahmen, Quelle: eigene Darstellung aufbauend auf Mitteregger et al. 2020: 73

Hinsichtlich eines möglichen Rückgangs des Parkplatzbedarfs bzw. in der Anzahl der zur Abwicklung der Verkehrsnachfrage benötigten Fahrzeuge wird deutlich, dass automatisierte Fahrzeuge verbunden mit einem hohen Anteil von Sharing, insbesondere Ride-Sharing, die Gesamtanzahl an Fahrzeugen um etwa 90 % verringern könnten, was auch zu einer Verminderung von benötigten Parkplätzen im Ausmaß von 80 % bis 90 % führen könnte. Private automatisierte Fahrzeuge, bei denen das Sharing nur durch die jeweiligen Mitglieder des Haushalts stattfindet, könnten hingegen die Gesamtanzahl an Fahrzeugen nur um etwa 10 % reduzieren. Dies hätte auch eine deutlich geminderte Verringerung von benötigten Parkplätzen und damit potenziell neu nutzbaren Flächen zur Folge.

Mit Hinblick auf eine Veränderung in der Standortwahl von Personen und Betrieben zeigt sich, dass private automatisierte Fahrzeuge – insbesondere wenn von einer Verringerung des Wertes der Zeit (Value of Time) im Fahrzeug und Kapazitätssteigerungen ausgegangen wird – zu einer Zunahme der Bevölkerungszahl in gut angebundenen suburbanen und ländlichen Gebieten (im Ausmaß von etwa 3 %), also zu einem tendenziell dispersen Stadtwachstum führen.

Ein effizienterer Öffentlicher Verkehr durch Automatisierung (z.B. automatisierte Shuttles für die letzte Meile) führt hingegen zu einer Zunahme der Bevölkerungszahl in städtischen Gebieten (im Ausmaß von etwa 2 bis 3 %) und damit tendenziell zu einer Begünstigung von Urbanisierungsprozessen.

Automatisierte Fahrzeuge mit Sharing könnten ebenso Zersiedelung und Suburbanisierungsprozesse dämpfen, wobei sich auch zeigt, dass sich manche Bevölkerungsgruppen aufgrund der verbesserten Erreichbarkeit weiter entfernt vom Stadtzentrum ansiedeln könnten. Automatisierte Fahrzeuge mit Sharing könnten überdies zu einem weiteren Deindustrialisierungstrend in Städten, d.h. zu einer weiteren Standortverschiebung von Betrieben aus dem sekundären Sektor in Gebiete außerhalb der Stadt (Erhöhung der Arbeitsplatzdichte im sekundären Sektor in suburbanen Gebieten im Ausmaß von etwa 5 %), beitragen.

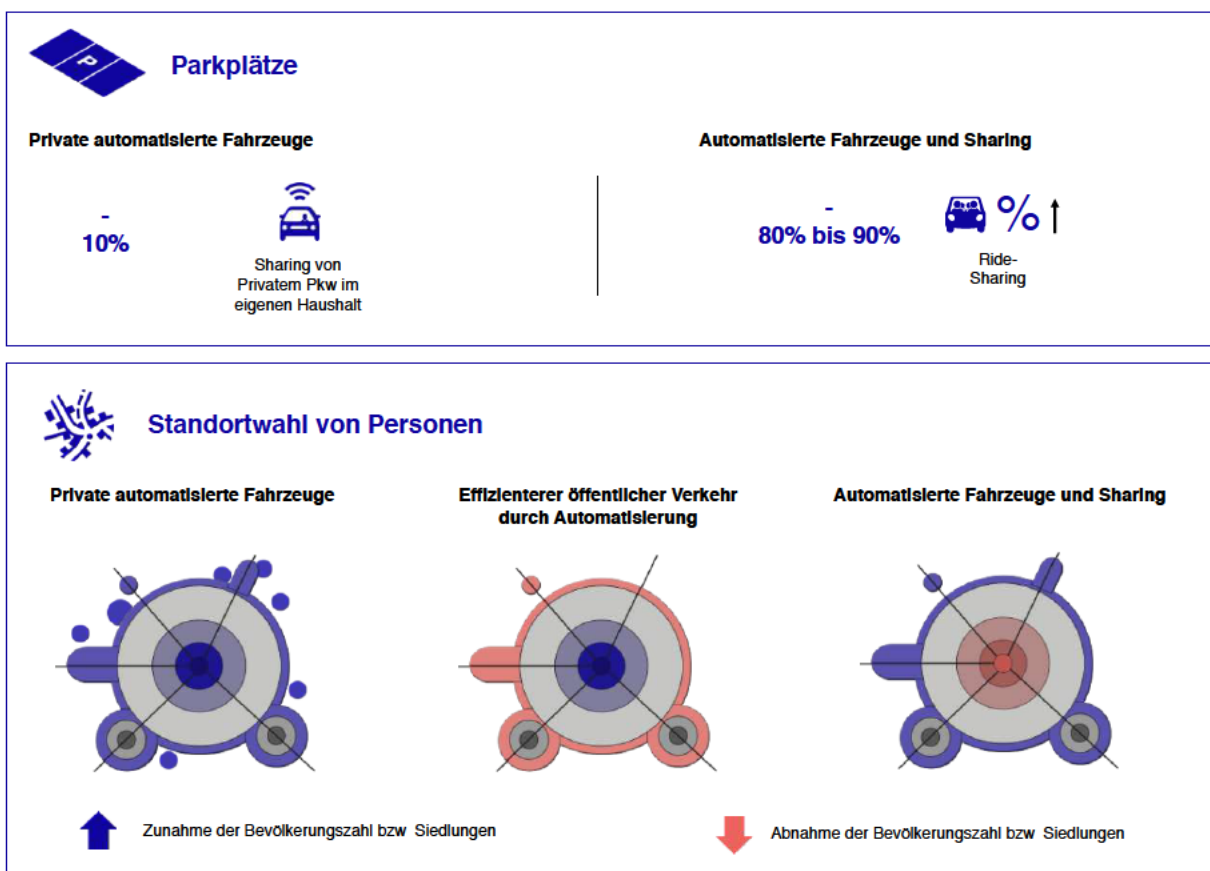


Abbildung 13: Überblick über die Spannweiten der Wirkungen automatisierter Fahrzeuge auf Parkplätze sowie die Standortwahl von Personen, Quelle: eigene Darstellung aufbauend auf Mitteregger et al. 2020: 75

Die derzeitigen und im Literaturreview berücksichtigten Modellierungsstudien untersuchen jedoch mehrheitlich den umfangreichen Einsatz weit entwickelter automatisierter Fahrzeuge (SAE-Level 5) in ferner Zukunft. Mögliche Effekte in naher Zukunft, wie der etwaige Einsatz von automatisierten Fahrzeugen allein unter bestimmten Bedingungen (ODD), z.B. in bestimmten räumlichen Kontexten (SAE-Level 4), und dabei auch eine Berücksichtigung unterschiedlicher Straßenräume (vgl. Beiker 2019: 125; Shladover 2018: 8), waren bisher selten Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.

Themenkomplex 2: Wie lässt sich die technisch-infrastrukturelle Eignung von Straßenräumen für das automatisierte Fahren bewerten?

Das entwickelte Framework für die Automated Drivability und die GIS-gestützte Analyse der Automated Drivability am Beispiel von Wien (Kapitel 5) konnten den spezifischen Zusammenhang zwischen automatisierten Fahrsystemen und ihrer räumlichen Einsatzumgebung aufzeigen. Spezifische Elemente des Straßenraums, wie die Anzahl und Diversität von Objekten, der Zustand und die Konfiguration der Straßeninfrastruktur, das Geschwindigkeitslimit und die Stabilität der Bedingungen im Straßenraum stellen Faktoren dar, welche die Prozesse, die für das Ausführen der Fahraufgabe durch das automatisierte Fahrzeug notwendig sind, wie 1) die Umfelderkennung und -abbildung, 2) die Planung und das Treffen einer entsprechenden Fahrentscheidung sowie 3) die Ausführung der entsprechenden Fahrentscheidung, beeinflussen und erschweren können.

Die für das gesamte Straßennetz von Wien durchgeführte Analyse anhand von abgeleiteten und verknüpften Indikatoren für die obigen angeführten Faktoren konnte deutlich machen, dass Städte keine homogenen Räume für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge darstellen (Abbildung 14). Speziell die älteren, innerstädtischen Teile im Zentrum von Wien mit ihren vielen verwinkelten Straßen, häufig komplexen Kreuzungen und vorhandenem Öffentlichen Verkehr (z.B. Straßenbahnen) sowie die Hauptverkehrsstraßen mit hoher Fahrgeschwindigkeit und einer Vielzahl an FußgängerInnen und RadfahrerInnen sind aus technisch-infrastruktureller Sicht tendenziell schlechter für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge geeignet, da diese Straßenräume komplexere Fahrumgebungen aufweisen (solche Straßenräume machen etwa 13 % des gesamten Straßennetzes Wiens aus). Hingegen bieten Autobahnen und Schnellstraßen auf denen FußgängerInnen und RadfahrerInnen nicht unterwegs sind sowie auch Gebiete in den Außenbezirken bzw. am Stadtrand von Wien, die oftmals durch breite Straßen mit wenig Verkehr und insbesondere wenig FußgängerInnen und RadfahrerInnen und geringen Geschwindigkeiten gekennzeichnet sind, tendenziell einfachere Bedingungen für automatisierte Fahrzeuge und sind für deren Einsatz aus technisch-infrastruktureller Sicht besser geeignet (solche Straßenräume machen etwa 38 % des gesamten Straßennetzes Wiens aus).

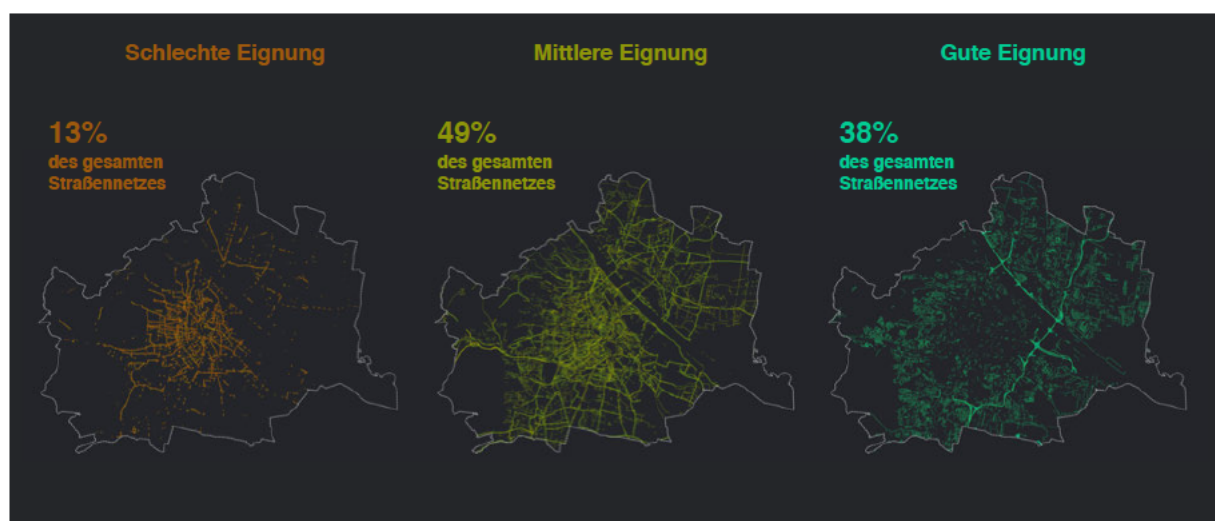


Abbildung 14: Technisch-infrastrukturelle Eignung des Straßennetzes Wiens für automatisierte Fahrsysteme und Anteil an Gesamtlänge des gesamten Straßennetzes Wiens, Quelle: eigene Darstellung

Insgesamt wurde deutlich, dass Teile der oft dispersen Stadtgebiete in der Peripherie aus technisch-infrastruktureller Sicht tendenziell einen Vorteil gegenüber älteren, meist komplexeren Stadtquartieren in innerstädtischen Bereichen haben. Während automatisierte Fahrzeuge in Ersteren ohne (größere) Anpassungen und wahrscheinlich relativ bald eingesetzt werden könnten, wäre der Einsatz von automatisierten Fahrzeugen in Letzteren zumindest in naher Zukunft nur denkbar, wenn größere Anpassungen im Bereich der baulichen Infrastruktur (z.B. eigene Fahrstreifen, bauliche Trennung von Verkehrsarten) vorgenommen werden, die Geschwindigkeit reduziert wird bzw. automatisierte Fahrzeuge mit geringer Geschwindigkeit unterwegs sind oder digitale Infrastruktur (z.B. Vehicle-to-Infrastructure) eingesetzt wird, welche die Fahrzeuge bei den Prozessen zur Ausführung der Fahraufgabe unterstützen.

Diese – am Beispiel von Wien dargestellte – Heterogenität von Straßenräumen hinsichtlich ihrer technisch-infrastrukturellen Eignung für automatisierte Fahrzeuge bedeutet auch, dass die Vor- und Nachteile des Einsatzes von automatisierten Fahrzeugen zumindest in naher Zukunft, d.h. in den nächsten Jahren, ungleichmäßig verteilt wären und selektive Verschiebungen der Erreichbarkeit mit automatisierten Fahrzeugen und damit der Lagegunst wahrscheinlich sind. Auswirkungen können sich aber nicht nur durch den Einsatz der Fahrzeuge zeigen, auch die prinzipielle Ertüchtigung des Einsatzes in eher komplexeren Gebieten z.B. durch geringere Geschwindigkeiten, oder durch physische oder digitale Infrastrukturen hätte verkehrliche und räumliche Auswirkungen.

Themenkomplex 3: Wie lässt sich die Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen in Straßenräumen unter Berücksichtigung der mit ihnen verbundenen Wirkungen bewerten?

Die GIS-gestützte Untersuchung der straßenräumlichen Verträglichkeit automatisierter Fahrzeuge auf Grundlage von verschiedenen Szenarien mit automatisierten Fahrzeugen am Beispiel Wiens (Kapitel 6) konnte aufzeigen, dass ein On-Demand Ride Service mit automatisierten Shuttles (sowohl mit Tür-zu-Tür-Beförderung als auch mit Haltestellen Beförderung) vor allem in innerstädtischen niederrangigen Straßen zu einer Verringerung der Verträglichkeit beitragen würde. Der Verkehr in diesen Gebieten und insbesondere auf den dortigen Hauptverkehrsstraßen ist schon heute vielfach kaum mit den Bedürfnissen und Anforderungen angrenzender Nutzungen sowie von FußgängerInnen und RadfahrerInnen, die im Straßenraum unterwegs sind oder sich dort aufhalten, verträglich. Ein Einsatz eines On-Demand Ride Service mit automatisierten Shuttles würde hier zu einer weiteren Zunahme an Verkehr (häufig um etwa 100 Fahrzeuge mehr in der Spitzenstunde) führen und damit die Verträglichkeit weiter verringern. Hingegen sind für ein solches On-Demand Ride Service mit automatisierten Shuttles – dies gilt für ein Service mit Haltestellen-Beförderung stärker als für jene mit Tür-zu-Tür-Beförderung – vor allem auf Hauptverkehrsstraßen in Außenbezirken Verbesserungen der Verträglichkeit ersichtlich. Zudem sind grundsätzlich in einigen Bereichen in den Außenbezirken (z.B. Gewerbegebiete) tendenziell ebenso höhere Verkehrszunahmen möglich, bevor sich die Verträglichkeit verringern würde, da das derzeitige Verkehrsaufkommen in diesen Straßenräumen sehr gering ist und die Bedürfnisse und

Anforderungen der umliegenden Nutzungen sowie NutzerInnen geringer sind als in innerstädtischen Straßenräumen.

Private automatisierte Fahrzeuge (verbunden mit einer allgemeinen Kapazitätserhöhung) führen hingegen zu einer Verringerung der Verträglichkeit vor allem auf höherrangigen Straßen, insbesondere innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen, bei denen bereits heute das Verkehrsaufkommen nicht verträglich ist. Oftmals sind es auf diesen Straßen Zunahmen von 250 Fahrzeugen und mehr in der Spitzenstunde, die zu einer weiteren Verringerung der Verträglichkeit führen und dazu, dass die bereits bestehende Trenn- bzw. Barrierewirkung solcher Straßen noch weiter verstärkt werden würde.

Insgesamt wurde deutlich, dass vor allem in Gebieten in den Außenbezirken, in denen die Sensibilität gegenüber einer weiteren Zunahme von Fahrzeugen durch automatisierte Fahrzeuge geringer ist und den Ansprüchen von NutzerInnen und Umfeldnutzungen weniger entgegensteht als in innerstädtischen Bereichen, der Einsatz eines On-Demand Ride Service mit automatisierten Shuttles zusätzlich zum Öffentlichen Verkehr bzw. als Zubringer zu größeren Haltestellen das Verkehrsaufkommen in diesen Bereichen (in einem Ausmaß von etwa 100 Fahrzeugen in der Spitzenstunde) verringern könnte und somit für Städte interessant sein könnte. Im Gegensatz dazu sollte in Straßenräumen, in denen das aktuelle Verkehrsaufkommen in der Spitzenstunde bereits derzeit schon nicht mit den Nutzungsansprüchen vereinbar ist und insbesondere in innerstädtischen Bereichen, in denen automatisierte Fahrzeuge das Verkehrsaufkommen weiter erhöhen, auf den Einsatz automatisierter Fahrzeuge verzichtet werden oder diese gleichfalls verträglicher (z.B. durch die Umsetzung von Fuß- und Radverkehrsinfrastruktur) für die Bedürfnisse von FußgängerInnen und RadfahrerInnen gestaltet werden.

Zusammenführung der Erkenntnisse

Zusammenfassend zeigt sich, dass automatisierte Fahrzeuge umfangreiche verkehrliche und räumliche Wirkungen erwarten lassen. Dabei werden automatisierte Fahrzeuge (private oder mit Sharing) überwiegend mit einer Zunahme der Verkehrsleistung, d.h. gefahrene Fahrzeugkilometer verbunden. Eine Reduktion des Verkehrsaufwands zeigt sich allein bei der Annahme eines sehr hohen Anteils von Ride-Sharing und damit eines hohen Besetzungsgrades.

Der Einsatz automatisierter Fahrzeuge und damit auch deren verkehrliche und räumliche Wirkungen sind jedoch sehr stark auch von der technisch-infrastrukturellen Eignung der Straßenräume abhängig. Hierbei sind innerstädtische Straßenräume aus technisch-infrastruktureller Sicht tendenziell schlechter für automatisierte Fahrzeuge geeignet als Bereiche am Stadtrand und Stadtautobahnen. Letztlich sollte beim Einsatz automatisierter Fahrzeuge und unter Berücksichtigung obiger beschriebener Wirkungen jedoch auch deren Verträglichkeit mit den Ansprüchen von NutzerInnen und Umfeldnutzungen in Straßenräumen berücksichtigt werden. Hierbei sind innerstädtische Straßen grundsätzlich gegenüber einer weiteren Verkehrszunahme durch automatisierte Fahrzeuge sensibler als Straßenräume am Stadtrand wie z.B. Gewerbegebiete, und vor allem automatisierte Fahrzeuge mit Sharing könnten gerade in den Gebieten am Stadtrand auch zu einer Verringerung des Verkehrs führen bzw. zu einer Verbesserung der Erreichbarkeit, wenn sie als Zubringer zu Haltestellen des Öffentlichen Verkehrs eingesetzt werden.

Der Einsatz automatisierter Fahrzeuge in Gebieten am Standrand bzw. in Außenbereichen von Städten, z.B. als Zubringer zu größeren Haltestellen des Öffentlichen Verkehrs, ist umso mehr auch von einer technisch-infrastrukturellen Seite sinnvoll, da diese Gebiete im Vergleich zu den belebten Straßen und Kreuzungen in den Innenbereichen der Städte weniger komplexe Umgebungen für automatisierte Fahrzeuge darstellen.

Diese Erkenntnisse sollten in der Erarbeitung zukünftiger Strategien für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge mitberücksichtigt werden, denn die durchgeführten Analysen machen deutlich, dass es nicht nur räumlich differenzierte Ansätze für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge benötigt, sondern, dass in jedem Fall überhaupt im Sinne der Stadt-, Verkehrs- und Verkehrsinfrastrukturplanung gesteuert werden muss, d.h. steuernde, den Einsatz automatisierter Fahrzeuge begleitende Maßnahmen benötigt werden, sodass automatisierte Fahrzeuge einen Beitrag für formulierte Ziele in der Stadt- und Verkehrsplanung leisten können (siehe Kapitel 8.2).

8. Reflexion der Ergebnisse, Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

8.1. Reflexion der Ergebnisse

Die Dissertation zeichnet erstmals ein umfassendes Bild über die verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge, berücksichtigt gleichfalls jedoch auch die Heterogenität unterschiedlicher Straßenräume vor dem Hintergrund der technisch-infrastrukturellen Eignung für automatisierte Fahrzeuge sowie der Verträglichkeit der mit automatisierten Fahrzeugen assoziierten verkehrlichen Wirkungen mit den Ansprüchen von NutzerInnen und Umfeldnutzungen.

Die drei Artikel ordnen sich dabei in den aktuellen Forschungsdiskurs zum automatisierten Fahren ein. Ihr wesentlicher Beitrag liegt aber nicht nur in einer erstmaligen, umfassenden Übersicht verkehrlicher und räumlicher Wirkungen, die von automatisierten Fahrzeugen in weiterer Zukunft ausgehen könnten. Vielmehr werden mit den beiden Analysen am Beispiel der Stadt Wien erstmals auch räumlich differenzierte Analysen durchgeführt, die den Fokus auf die zeitlich naheliegende Phase des Übergangs legen, in der automatisierte Fahrzeuge vermutlich nur in Teilen des Straßennetzes eingesetzt werden können bzw. welche die Verträglichkeit der verkehrlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge mit NutzerInnen und Umfeldnutzungen in unterschiedlichen Straßenräumen untersuchen.

Auf der Grundlage aller Artikel zeigt sich, dass eine differenzierte Sichtweise auf automatisierte Fahrzeuge von besonderer Bedeutung ist. Dies gilt zunächst vor allem für die verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge, da diese von unterschiedlichen Einflussgrößen abhängig sein werden.

Obwohl die derzeit bestehenden und im Literaturreview (Kapitel 4) berücksichtigten Modellierungsstudien unterschiedliche methodische Zugänge (von mikroskopischen Modellen bzw. agenten-basierten-Modellen bis hin zu makroskopischen Modellen) aufweisen, sind es allen voran die Art (des Einsatzes) automatisierter Fahrzeuge (z.B. private automatisierte Fahrzeuge, als (Ride-)Sharing-Service, im Öffentlichen Verkehr), jedoch auch Annahmen zur Durchdringungsrate sowie zu deren Effekten hinsichtlich Veränderungen beim Value of Time (Zeitwahrnehmung und -bewertung), einer Steigerung der Straßenkapazität oder Betriebskosten (siehe hierzu auch Kapitel 2), die wesentlichen Einfluss auf die verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge haben werden (vgl. Soteropoulos et al. 2019: 98). Hinzu kommen weitere Einflussgrößen wie beispielsweise bestehende Wartezeiten bei einem (Ride-)Sharing Service mit automatisierten Fahrzeugen sowie auch die bestehende Siedlungsstruktur, die ihrerseits die Wirkungen beeinflusst.

Grundsätzlich lässt sich hierbei erkennen, dass neben der Art des Einsatzes, Annahmen zu den Effekten hinsichtlich Veränderungen beim Value of Time die verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge stärker beeinflussen als Annahmen zur Steigerung der Straßenkapazität oder zu Betriebskosten. Hier muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass die Effekte automatisierter Fahrzeuge hinsichtlich Veränderungen beim Value of Time trotz zahlreicher bestehender Stated Preference Studien (z.B. de Correia et al. 2019, Kolarova et al. 2019) meist noch nicht empirisch fundiert sind, da automatisierte Fahrzeuge noch kaum im realen Verkehr unterwegs sind und der tatsächliche Effekt auch davon abhängt, welche Tätigkeiten man im Fahrzeug auch vor dem Hintergrund von möglicher Reiseübelkeit (vgl. Le

Vine et al. 2015) durchführen kann (vgl. Harb 2021). Weitere, erst kürzlich erschienene Studien betrachten zudem spezifisch auch Einflussfaktoren wie die betriebliche Operation von Fahrzeugen oder die entsprechenden Businessmodelle (vgl. Narayanan et al. 2020). Die Wirkungen automatisierter Fahrzeuge werden sich aufgrund all dieser Einflussfaktoren somit differenziert zeigen, wobei im Rahmen dieser Arbeit in jedem Fall die prinzipiellen verkehrlichen und räumlichen Wirkrichtungen aufgezeigt werden konnten, wenn automatisierter Fahrzeuge in späterer Zukunft in umfassender Form, d.h. als vollautomatisierte Fahrzeuge zur Verfügung stehen.

Ein wichtiger Aspekt spielt dabei vor allem in naher Zukunft jedoch auch die räumliche Ebene, die bisher nur unzureichend berücksichtigt wurde, aber für die Effekte und den Einsatz automatisierter Fahrzeuge aus planerischer Sicht von Relevanz ist. Hierbei konnten die beiden Analysen für Wien aufzeigen, dass sich sowohl die technisch-infrastrukturelle Eignung für automatisierte Fahrzeuge als auch deren Verträglichkeit in unterschiedlichen Straßenräumen unterscheiden und daher mit unterschiedlichen Wirkungen in verschiedenen Gebieten von Städten gerechnet werden muss – die räumliche Umgebung spielt somit für die Wirkungen und den Einsatz automatisierter Fahrzeuge insbesondere in naher Zukunft eine wichtige Rolle.

Zwar wurde die Rolle von möglichen Teilnetzwerken für automatisierte Fahrzeuge in vereinzelt Studien untersucht (vgl. Madadi et al. 2020), jedoch zeigt die Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung erstmals umfassende und dezidierte Erkenntnisse für das gesamte Straßennetz einer Stadt (in diesem Fall Wien) sowie mit dem entwickelten allgemeinen Framework (Kapitel 5), welches die Grundlage für die Analyse bildet, auch Möglichkeiten zu einer weiteren umfassenden Betrachtung und Anwendung in anderen Städten auf. Hinsichtlich der Einordnung der Ergebnisse gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass es sich mit Wien um eine historisch gewachsene europäische Stadt mit gerade im Zentrum sehr engen und verwinkelten Straßenräumen handelt. Hier wird es interessant sein, ob sich ähnliche Ergebnisse auch für US-amerikanische Städte zeigen, die meist durch weniger verwinkelte Straßen als vielmehr durch ein rasterähnliches System mit breiten Straßen charakterisiert sind.

Zudem sollte berücksichtigt werden, dass sich die jeweilige Automatisierungstechnologie der automatisierten Fahrsysteme weiterentwickelt. In Zukunft müsste eine solche Bewertung also dahingehend angepasst werden, dass bestimmte Aspekte, die heute Herausforderungen für automatisierte Fahrsysteme darstellen, adaptiert werden, wenn diese mit der fortschreitenden technologischen Entwicklung der automatisierten Fahrsysteme dann gemeistert werden können.

Dass die räumliche Ebene eine wichtige Rolle spielt und einer Differenzierung verlangt, wurde ebenso durch die Analysen im dritten Artikel (Kapitel 6) deutlich. Hierbei konnten die Ergebnisse für die verkehrlichen Effekte der Szenarien zunächst deutlich machen, dass sich die verkehrlichen Wirkungen in verschiedenen Gebieten in der Stadt in unterschiedlicher Form zeigen bzw. sich die Veränderungen in der Verkehrsleistung durch automatisierte Fahrzeuge sehr unterschiedlich in den einzelnen Straßenräumen und Gebieten verteilen. Damit zeigten sich ähnliche Ergebnisse wie jene, die in den Studien des ITF (2015) und von Friedrich & Hartl (2016) aufgezeigt (und auch im systematischen Literaturreview berücksichtigt) wurden, in welchen für jene Szenarien mit geteilten automatisierten Fahrzeugen ebenso Zunahmen in

der Verkehrsleistung besonders in den innerstädtischen Gebieten erkennbar waren, während vor allem auf Hauptverkehrsstraßen am Stadtrand auch Abnahmen deutlich wurden.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des Artikels jedoch nicht nur die verkehrlichen Wirkungen untersucht, sondern erstmalig auch die Verträglichkeit dieser Wirkungen mit den Ansprüchen von NutzerInnen und Umfeldnutzungen betrachtet. Dies ergab erstmals umfassende und detaillierte Ergebnisse, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Analyse nur eine grobe, erste Bewertung darstellt.

Letztlich konnte die Zusammenstellung bzw. Verschränkung beider Analysen für Wien, d.h. hinsichtlich der technisch-infrastrukturellen Eignung einerseits und hinsichtlich der Verträglichkeit andererseits, eine weitere Detaillierungsebene aufzeigen, die es ermöglicht spezifische, räumlich differenzierte Strategien für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge abzuleiten. Gerade in Bezug auf die technisch-infrastrukturelle Eignung stellt sich bei den Strategien jedoch natürlich auch immer die Frage nach dem Mitteleinsatz, wenn man in Gebieten, die aus technisch-infrastruktureller Sicht nicht geeignet sind, dennoch, beispielsweise mittels infrastruktureller Maßnahmen, den Einsatz automatisierter Fahrzeuge forcieren will (vgl. Madadi et al. 2020). Gleichfalls spielt der Mitteleinsatz natürlich auch eine Rolle, wenn begleitende Maßnahmen bzw. Abmilderungsmaßnahmen zur Erhöhung der Verträglichkeit im Zuge des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge nötig wären. Auch der letztgenannte Aspekt sollte somit bei zukünftigen Strategien hinsichtlich des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge berücksichtigt werden.

8.2. Empfehlungen

Der Überblick über die prinzipiellen verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge sowie auch die beiden räumlich differenzierten Analysen für Wien scheinen insbesondere für die Planungspraxis von besonderer Relevanz. Solche Analysen und Bewertungen und ihre Ergebnisse ermöglichen letztlich immer auch das Aufzeigen von Handlungsspielräumen für politische EntscheidungsträgerInnen. Zwar lässt sich ganz grundsätzlich festhalten, dass sich die Entscheidungsgrundlagen rund um den Einsatz automatisierter Fahrzeuge aufgrund aktueller und in der Vergangenheit durchgeführter Studien erst herausbilden, dass mit der Arbeit jedoch wesentliche Schritte für die Herausbildung differenzierter Entscheidungsgrundlagen erarbeitet werden konnten. Hierbei wurde unter anderem erkennbar, dass insbesondere zu den verkehrlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge bereits zahlreiche Studien bestehen, während hinsichtlich der räumlichen Wirkungen bisher nur vereinzelte und kaum differenzierte Studien durchgeführt wurden. Und auch die Ansätze für die Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen sowie hinsichtlich der Bewertung der straßenräumlichen Verträglichkeit automatisierter Fahrzeuge stellen erstmalig differenziertere Ergebnisse zur Verfügung. Es mag womöglich zu früh sein, um spezifische Entscheidungen für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge aufgrund der Ergebnisse der Arbeit zu treffen. Jedoch ist es unerlässlich schon heute Weichen für zukünftige Entwicklungen zu stellen, sodass automatisierte Fahrzeuge einen Beitrag zu Zielen in der Verkehrs- und Stadtentwicklung leisten (vgl. Agora Verkehrswende 2020: 5, Mitteregger et al. 2020: 146) und so lassen sich zumindest anhand der groben Stoßrichtungen, die aus den Ergebnissen der Arbeit erkennbar sind, grobe Strategien und Leitlinien für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge ableiten, aber ebenso

solche Maßnahmen, die heute schon gesetzt werden können, die jedoch auf den Einsatz automatisierter Fahrzeuge in Zukunft essentielle Wirkung haben werden:

- a) Das systematische Literaturreview zu den verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge macht deutlich, dass letztlich begleitende und steuernde Maßnahmen und Strategien für deren Einsatz aus Sicht der Stadt-, Verkehrs- und Infrastrukturplanung unerlässlich sind, sodass automatisierte Fahrzeuge einen Beitrag zu verkehrspolitischen Zielen und Zielen im Bereich der Siedlungsentwicklung leisten können. Prinzipiell sollte hierbei ein Einsatz von automatisierten Fahrzeugen als Ride-Sharing Service oder im Öffentlichen Verkehr angestrebt werden, es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass vor allem das Teilen von Fahrten forciert werden muss (z.B. durch ein Verbot oder Kosten für bzw. Abgaben auf Leerfahrten von automatisierten Fahrzeugen) bzw. sonstige Maßnahmen (z.B. dynamisches Mobility Pricing, d.h. differenzierte Straßenbenutzungsgebühren nach Zeit, Ort, Besetzungsgrad etc.) eingesetzt werden müssen, um den drohenden Zunahmen bei der Verkehrsleistung entgegenzuwirken (vgl. Bösch 2018, Soteropoulos et al. 2019: 161).
- b) Mit dem Fokus auf die nahe Zukunft, in der ein Einsatz automatisierter Fahrzeuge noch nicht ubiquitär möglich sein wird, kann anhand der Ergebnisse der durchgeführten Analysen im Rahmen dieser Arbeit aus verkehrsplanerischer und stadtplanerischer Sicht ein Einsatz automatisierter Fahrzeuge oder zumindest die Durchführung vom Tests am Stadtrand als Zubringer zum Öffentlichen Verkehr empfohlen werden. Dies ist vor allem deshalb sinnvoll, da in den Gebieten am Stadtrand die technisch-infrastrukturelle Eignung meist hoch ist und gleichzeitig auch die Sensibilität gegenüber zusätzlichem Verkehr durch automatisierte Fahrzeuge meist gering ist bzw. durch solche Zubringer ohnehin auch Verkehr verringert bzw. verlagert werden kann. Diesbezügliche Pilotprojekte mit automatisierten Fahrzeugen (siehe hierzu beispielsweise die Projekte SmartBus am östlichen Stadtrand von Aalborg in Dänemark (vgl. SmartBus 2021) oder auch autobus.Seestadt im neuen am Stadtrand liegenden Stadtentwicklungsgebiet Seestadt Aspern in Wien (vgl. Wiener Linien 2021) könnten bereits heute dazu beitragen entsprechende Grundlagen und Erfahrungen für den Betrieb und den Einsatz automatisierter Fahrzeuge in diesen Bereichen (auch im Sinne entsprechender Testdatensätze) zu sammeln und gleichzeitig auch die Akzeptanz in der Bevölkerung zu erhöhen.
- c) Die oben genannten Zubringer sollten jedoch bereits heute schon auch ohne automatisierte Fahrzeuge eingesetzt werden, da es nicht nur um die Sammlung von Erfahrungen rund um den technischen Einsatz automatisierter Fahrzeuge geht, sondern auch um Erfahrungen zum Betrieb sowie auch darum integrative Voraussetzungen (z.B. digitale Einbettung der Fahrzeuge in den Öffentlichen Verkehr) für den späteren Betrieb mit automatisierten Fahrzeugen zu schaffen. Eine solche Maßnahme kann somit auch als „no regret“ Maßnahme in Bezug auf den Einsatz automatisierter Fahrzeuge bezeichnet werden, da diese bereits heute auch ohne Automatisierung von Relevanz ist.
- d) Im Gegensatz dazu sollte in innerstädtischen Bereichen (in Wien umfasst dies vor allem die Bereiche der Innenbezirke) sowie in Bereichen, in denen bereits heute das Verkehrsaufkommen mit den Nutzungsansprüchen unvereinbar ist, eher auf den Einsatz automatisierter Fahrzeuge verzichtet werden bzw. ein Einsatz automatisierter Fahrzeuge mit Maßnahmen verbunden werden, welche die Verträglichkeit erhöhen,

z.B. durch die Umsetzung und Implementierung von Fuß- und Radverkehrsinfrastruktur, Geschwindigkeitsreduzierung oder zusätzliche Querungshilfen. Hier erscheint insbesondere die Umwandlung von Parkplätzen zugunsten solcher Gestaltungselemente sowie zugunsten von Flächen für FußgängerInnen und RadfahrerInnen wichtig und könnte im Hinblick auf zukünftige Konzepte mit automatisierten Fahrzeugen eine geeignete und (stärker akzeptierte) Maßnahme werden, da der Parkplatzbedarf – insbesondere im Falle von automatisierten Fahrzeugen mit Sharing – reduziert werden könnte.

Eine mögliche Anwendung des Bündelungsprinzips (vgl. VCÖ 2016: 25, Umweltbundesamt 2015: 132), d.h. ein Einsatz von automatisierten Fahrzeugen (und damit die Bündelung der Verkehrszuwächse) beispielsweise allein auf Hauptverkehrsstraßen (oder einzelnen technisch-infrastrukturell gut-geeigneten Straßen) sollte vermieden werden, da dort bereits heute das Verkehrsaufkommen mit den Nutzungsansprüchen meist unvereinbar ist und sich die Verträglichkeit bei einer solchen Bündelung noch weiter (bzw. sehr stark) verringern werden würde.

- e) Aufgrund der unterschiedlich technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge ist zudem von einer Veränderung der Lagegunst von Standorten auszugehen, je nachdem, ob und wie gut diese für automatisierte Fahrzeuge erreichbar sind (selektive Erreichbarkeit). Hier haben Standorte bzw. Gebiete an Autobahnen und am Stadtrand einen Vorteil gegenüber Bereichen in der Innenstadt, was Ansiedelungen bzw. die Erschließung dieser Gebiete insbesondere durch (Logistik-)Unternehmen forcieren wird. Diesbezüglich erscheinen eine Steuerung der Siedlungsentwicklung über Bodenpolitik (z.B. Flächenwidmung) sowie stadregionale Kooperationen (Stadtrand mit angrenzenden Umlandgemeinden) von Relevanz, um Lagegunst-Effekte auszugleichen (vgl. Soteropoulos et al. 2019: 161 f).

8.3. Limitationen

Das in dieser Arbeit durchgeführte systematische Literaturreview sowie auch die beiden räumlich differenzierten Analysen für Wien bieten zwar erstmals umfassende Ergebnisse. Dennoch gilt es ebenso vorhandene Limitationen zu berücksichtigen. Diese umfassen die folgenden Bereiche:

- Modelle für die Abschätzung der verkehrlichen und räumlichen Wirkungen
Durch das systematische Literaturreview konnte eine umfangreiche Abbildung der verkehrlichen und räumlichen Wirkungen dargelegt werden. Die verwendeten Modelle in den Studien, die im Literaturreview berücksichtigt wurden, sind jedoch meist von unterschiedlicher Aktualität und insbesondere die integrierten Raumnutzungs- und Verkehrsmodelle zur Abschätzung der räumlichen Wirkungen beruhen häufig auf wenig aktuellen und kaum differenzierten Daten hinsichtlich verschiedener Faktoren für die Standortwahl. Hinzu kommt, dass in den meisten Studien bzw. in den hierfür angewandten Modellen induzierter Verkehr und die Berücksichtigung neuer Nutzergruppen (z.B. Verfügbarkeit automatisierter Fahrzeuge für Personen ohne Führerschein oder mobilitätseingeschränkte Personen) kaum Berücksichtigung fand, was jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge hätte. Zudem ist die Maßnahmenreagibilität in

Folge automatisierter Fahrzeuge empirisch noch wenig abgesichert und es benötigt in diesem Zusammenhang noch vermehrt Stated-Choice-Experimente zur Verkehrsmittelwahl und dem Mobilitätswerkzeugbesitz in Bezug auf automatisierte Fahrzeuge (vgl. Soteropoulos et al. 2019: 98, Hörl et al. 2019: 9).

- Verfügbarkeit von Daten

Speziell für die Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrsysteme gilt es zu berücksichtigen, dass für die Ableitung der Indikatoren allein öffentlich zugängliche Daten verwendet wurden. Klarerweise hängt jedoch die Genauigkeit einer solchen Bewertung von den verfügbaren Daten zur jeweiligen Berechnung der Indikatoren ab, wobei für eine Verbesserung der Bewertung weitere und genauere Daten zur Abbildung der jeweiligen Herausforderungen für automatisierte Fahrsysteme nötig wären. Während für einige der Herausforderungen für automatisierte Fahrzeuge vorhandene Datenquellen wie HD Maps, Straßenansichtsdienste (z.B. Google Street View, Mapillary), Verkehrsmodelle, crowdgesourcete Daten (z.B. Strava) oder Datensätze von Herstellern (OEMs) helfen könnten, die jeweilige Herausforderung für automatisierte Fahrzeuge besser in der Bewertung zu berücksichtigen, wären für andere Echtzeitinformationen, beispielsweise über das Vorhandensein verschiedener dynamischer Objekte, über den Zustand der Straßeninfrastruktur sowie über Verkehrsbedingungen (z.B. Bauarbeiten) und Wetterbedingungen nötig, bei denen die Datenverfügbarkeit als deutlich schlechter eingestuft werden kann.

Es sollte jedoch auch berücksichtigt werden, dass die Anforderungen an die Genauigkeit der Indikatoren, welche die Herausforderungen für automatisierte Fahrsysteme abbilden, natürlich auch stark vom Verwendungszweck der Bewertung abhängen: Während für Fragestellungen der Stadt- und Verkehrsplanung oder der Standortentwicklung auch eine Bewertung bzw. Analyse mittels Indikatoren auf Grundlage öffentlich verfügbarer Daten einen breiten Überblick und erste Hinweise hinsichtlich eines möglichen Einsatzes von automatisierten Fahrzeugen in Städten geben kann, wären jedoch für die weitere Spezifizierung und abschließende Definition von Operational Design Domains präzisere und aufwändigere Indikatoren und darüber hinaus eine empirische Erprobung in den bewerteten potenziellen Operational Design Domains erforderlich.

Auch für die Bewertung der straßenräumlichen Verträglichkeit standen zum Teil für den Ansatz benötigte Daten – z.B. Daten zur Anzahl von FußgängerInnen und RadfahrerInnen oder auch E-Scooter-NutzerInnen sowie zum Anteil des Lkw-Verkehrs – nicht detailliert genug zur Verfügung und es wurde stattdessen auf näherungsweise Daten für die spezifischen Merkmale des Straßenraums zurückgegriffen.

- Berücksichtigung der relevanten Aspekte automatisierter Fahrzeuge für die Bewertung der straßenräumlichen Verträglichkeit

Der angewandte Kompensatorische Ansatz für die Bewertung der Verträglichkeit automatisierter Fahrzeuge in unterschiedlichen Straßenräumen gibt dem Faktor Verkehrsaufkommen in der Spitzenstunde ein hohes Gewicht, wodurch die Dichte von (und Lücken zwischen) Fahrzeugen indirekt berücksichtigt werden kann. Somit kann mit Hilfe dieses Ansatzes eine grobe Abschätzung bezüglich der Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen im Straßenraum vorgenommen werden. Andere Aspekte

automatisierter Fahrzeuge im Straßenraum, z.B. das Halten von automatisierten Fahrzeugen im Straßenraum zum Aufnehmen oder Absetzen von Fahrgästen im Zuge eines (Ride-)Sharing Service, könnten jedoch die trennende bzw. barrierebildende Wirkung der Straßen, d.h. Verringerung der Durchlässigkeit der Straßenräume, weiter erhöhen und haben damit auch einen Einfluss auf die Verträglichkeit, wurden jedoch nicht betrachtet.

- Verträglichkeit als normativer Ansatz und Problematik der Kompensation

Der Ansatz der Bewertung der Verträglichkeit automatisierter Fahrzeuge mit den Bedürfnissen der NutzerInnen und Umfeldnutzungen in unterschiedlichen Straßenräumen ist von Natur aus ein normativ geprägter. Die Verträglichkeitsanalyse dient der Interessensabwägung unter Berücksichtigung möglichst aller Anforderungen und Nutzungsansprüche (insbesondere jener von FußgängerInnen und RadfahrerInnen) an den Straßenraum. Ob jedoch der Straßenverkehr verträglich ist und was ein noch verträgliches Maß ist, kann nicht generell nach objektiven Kriterien festgelegt werden (vgl. Häfliger et al. 2015: 36). Es verlangt in gewisser Weise immer auch einer normativen Festsetzung: So wurden zwar die Werte des maximal verträglichen Verkehrsaufkommens aus der Literatur abgeleitet und auch eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse zur Verträglichkeit hängen aber natürlich dennoch stark von den Werten des maximal verträglichen Verkehrsaufkommens und den definierten Gebietskategorien ab. Zudem spielt die Adaptierung dieser Werte auf Grundlage der verschiedenen Merkmale bzw. Einflussfaktoren sowie deren jeweilige Gewichtung eine wichtige Rolle. Obwohl all diese Aspekte auf vorhandener Literatur beruhen und auch mit Stakeholdern der Stadt Wien hinsichtlich ihrer Plausibilität diskutiert wurden, beruhen diese Themen letztlich auch auf normativen Einschätzungen und sollten in Zukunft weiter untersucht werden. Hierbei sollte auch der Umstand berücksichtigt werden, dass sich die prinzipielle Einstellung bzw. Haltung hinsichtlich des Maßstabs der Verträglichkeit, d.h. die Festsetzung ob der Straßenverkehr verträglich ist, auch zeitlich verändert und in verkehrsplanerische und stadtplanerische Diskurse und Zielvorstellungen der Politik eingebettet ist. Aktuell gewinnt beispielsweise vor dem Hintergrund des Klimawandels gerade in Städten vermehrt die Nutzung des Straßenraums durch FußgängerInnen und RadfahrerInnen sowie entsprechende bauliche und gestalterische Maßnahmen (z.B. Grünflächen und Bäume) an Relevanz in der Zielvorstellung an Straßenräumen (hierdurch verschärfen sich auch die Zielkonflikte mit den Bedürfnissen des motorisierten Individualverkehrs), wodurch sich auch die prinzipielle Einstellung bzw. Haltung hinsichtlich des Maßstabs der Verträglichkeit (im Sinne von „Wie viel Straßenverkehr ist noch verträglich?“) im Vergleich zu den ursprünglichen Anwendungen des Bewertungsansatzes in den 1980er und 1990er Jahren oder auch in jüngerer Zeit (Anfang der 2010er Jahre) deutlich verändert hat. Letztlich stellt sich in diesem Zusammenhang auch die Frage, ob gemäß dem Kompensatorischen Ansatz tatsächlich einzelne Aspekte gegenüber anderen aufgewogen werden können und letztlich durch eine Verbesserung der Verträglichkeit (z.B. durch bauliche oder gestalterische Maßnahmen) eine entsprechend höhere Verkehrsbelastung zugelassen werden kann (vgl. Häfliger et al. 2015: 36) oder ob vom Einsatz automatisierter Fahrzeuge in jenen Bereichen, in denen er die Verträglichkeit

verringern würde (vor allem innerstädtische Bereiche und innerstädtische Hauptverkehrsstraßen) eher gänzlich abgesehen werden sollte.

8.4. Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Arbeit sowie der obigen Ausführungen sollte in zukünftigen Arbeiten folgender weiterer Forschungsbedarf berücksichtigt werden:

Verkehrliche und räumliche Wirkungen automatisierter Fahrzeuge

- Das systematische Literaturreview konnte nicht nur die verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge darstellen, vielmehr wurde durch das Review ebenso deutlich, dass derzeit zwar zahlreiche Studien hinsichtlich der verkehrlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge bestehen, dass jedoch die räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge bislang nur in wenigen Studien untersucht wurden. Zukünftige Studien sollten stärker auf die räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge fokussieren. Hierbei sollte speziell auch der Zusammenhang mit unterschiedlichen sozialen Gruppen und räumlichen Strukturen thematisiert bzw. eine diesbezügliche Untersuchung der verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge durchgeführt werden.
- Zwar wurden mit dem systematischen Literaturreview die grundsätzlichen verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge in der weiteren Zukunft umfassend betrachtet. Vor dem Hintergrund eines räumlich begrenzten Einsatzbereiches in naher Zukunft gilt es jedoch auch die Wirkungen automatisierter Fahrzeuge für die nahe Zukunft zu untersuchen, d.h. wenn diese allein in bestimmten, insbesondere in den laut der Analyse technisch-infrastrukturell am besten geeigneten Teilbereichen unterwegs sind. Hier geht es darum die gut geeigneten Teilstraßennetze bzw. jene, in denen der Einsatz automatisierter Fahrzeuge auch verträglich ist, als Inputgrößen in die Verkehrsnachfrage- und Raumnutzungs- und Verkehrsmodelle miteinzubeziehen und die Wirkungen auf die Verkehrsleistung, den Modal Split sowie die Standortwahl von Personen simulativ abzuschätzen, jedoch auch potentielle Erreichbarkeitsveränderungen zu untersuchen. Neben einem diesbezüglich Fokus in zukünftigen Modellierungsstudien zu den verkehrlichen und räumlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge, wären hier ebenso bereits heute schon empirische Studien, z.B. hinsichtlich der Wirkungen des nur in einem Teilbereich von Phoenix, Arizona vorhandenen Service Waymo One interessant – hier sind also bereits heute schon reale empirische Erkenntnisse möglich (siehe hierzu auch die kürzlich erschienene Studie von Stopher et al. 2021, die eine Zunahme von Wegen bzw. zusätzliche Wege von NutzerInnen des Service Waymo One in Phoenix, Arizona ermitteln konnte). Eine solche Betrachtung der Wirkungen sollte in weiterer Folge auch als Ausgangsbasis für die Bewertung der Verträglichkeit mit den Ansprüchen von NutzerInnen und Umfeldnutzungen in unterschiedlichen Straßenräumen herangezogen werden.
- Hinsichtlich der derzeit genutzten Verkehrsnachfragemodelle sowie Raumnutzungs- und Verkehrsmodelle für die Abschätzung der Wirkungen automatisierter Fahrzeuge lässt sich zudem beobachten, dass die Anschaffung von automatisierten Fahrzeugen (Marktdurchdringung) bzw. die persönliche Affinität zur Nutzung automatisierter Fahrzeuge nur unzureichend berücksichtigt wird bzw. häufig allein als externe

Annahme Berücksichtigung findet. Was fehlt sind derzeit noch Modelle, welche die Fülle an spezifischen Faktoren (z.B. hinsichtlich sozialen Gruppen (Motive, Werte etc.) und räumlichen Strukturen) für die Anschaffung und auch die Affinität zur Nutzung unterschiedlicher Formen automatisierter Fahrzeuge (privat, Car-Sharing, Ride-Sharing) umfangreich abbilden.

Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge

- Die Analyse für die Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge stellt nur einen ersten Ansatz für die Bewertung dar, der in zukünftigen Studien weiterentwickelt werden müsste: Um die Genauigkeit der Analyse bzw. Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrsysteme zukünftig zu erhöhen, wäre der Einbezug von Datenquellen wie HD Maps, Straßenansichtsdienste (z.B. Google Street View, Mapillary), Verkehrsmodelle, crowdgesourcete Daten (z.B. Strava) oder Datensätzen von Herstellern (OEMs) sowie Echtzeitinformationen beispielsweise über das Vorhandensein verschiedener dynamischer Objekte, über den Zustand der Straßeninfrastruktur sowie über Verkehrsbedingungen (z.B. Bauarbeiten) und Wetterbedingungen nötig.
- Der Einbezug bzw. die Berücksichtigung von letztgenannten Daten würde zudem zu einer Bewertung der Eignung von Straßenräumen für automatisierte Fahrzeuge führen, die sich dynamisch in Echtzeit verändern (z.B. Wechsel der Wetterbedingungen) würde. In Zukunft muss daran gearbeitet werden, wie man solche Daten einbeziehen (hier könnten zumindest Echtzeitdaten des Google Traffic API, von Straßenbetreibern oder Wetterdiensten miteinbezogen werden) und eine dynamische Abbildung der Eignung vornehmen kann.
- Darüber hinaus sollten die für die Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung verwendeten Indikatoren in zukünftigen Arbeiten auf Basis technologischer Entwicklungen im Bereich der Sensoren oder der Software automatisierter Fahrsysteme weiter angepasst werden.

Bewertung der Verträglichkeit automatisierter Fahrzeuge in Straßenräumen

- Auch die Bewertung der Verträglichkeit anhand des Kompensatorischen Ansatzes stellt nur eine erste grobe Bewertung dar; dieser Ansatz sollte in zukünftigen Arbeiten ebenso weiterentwickelt werden, um eine detailliertere Analyse und Bewertung zu ermöglichen: In Zukunft sollten Aspekte wie das Halten von automatisierten Fahrzeugen im Straßenraum zum Aufnehmen oder Absetzen von Fahrgästen im Zuge eines (Ride-)Sharing Service sowie andere spezifische Aspekte des Verkehrsflusses und der Auswirkungen auf FußgängerInnen und RadfahrerInnen auf einer detaillierteren Ebene – beispielsweise durch den Einsatz von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen (z.B. VISSIM) zusätzlich zu MATSim – untersucht werden, um eine detailliertere Analyse der Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf die Trenn- und Barrierewirkung im Hinblick auf die Verträglichkeit zu erhalten.
- Zudem sollten noch weitere Aspekte bei künftigen Ansätzen zur Bewertung der Verträglichkeit miteinbezogen werden, z.B. Wartezeiten an Ampeln oder Ergebnisse der Untersuchung tatsächlicher Verkehrsinteraktionen zwischen FußgängerInnen und RadfahrerInnen mit automatisierten Fahrzeugen (vgl. Schieben et al. 2019, Pyrialakou

et al. 2020). Des Weiteren sollten auch zusätzliche, mögliche objektive Indikatoren bezüglich der Verträglichkeit untersucht werden, z.B. bedeutet eine geringe Verträglichkeit auch erhöhten Stress für FußgängerInnen und RadfahrerInnen, der mit Hilfe von Sensoren erfasst und kartiert werden könnte (z.B. Kyriakou et al. 2019), oder auch eine (visuelle) Bewertung der Qualität des Straßenraums mit Hilfe von maschinellem Lernen und anderen Ansätzen (z.B. Ye et al. 2019) könnte relevant sein, um die Verträglichkeit von automatisierten Fahrzeugen in unterschiedlichen Straßenräumen umfangreicher zu bewerten (und auch mögliche Umsetzungsstrategien zu entwickeln).

- Des Weiteren sollte in zukünftigen Studien versucht werden Daten für die Abbildung der Aspekte, z.B. Daten zur Anzahl von FußgängerInnen und RadfahrerInnen oder auch E-Scooter-NutzerInnen sowie zum Anteil des Lkw-Verkehrs in detaillierterer Form (z.B. aus Verkehrsmodellen oder von Mikromobilitätsanbietern) miteinzubeziehen.
- Letztlich sollte auch eine stärkere Betrachtung von Zusammenhängen zwischen den verschiedenen spezifischen Merkmalen des Straßenraums, z.B. Geschwindigkeit und Querbarkeit, und eine spezifischere Differenzierung zwischen verschiedenen Gebietskategorien für die Einteilung der Straßenräume bzw. die Berücksichtigung weiterer empirischer Erkenntnisse hinsichtlich der Relevanz der Merkmale im Zuge der Gewichtung erfolgen.

Die Analysen und Ansätze liefern somit zwar erstmals differenzierte Ergebnisse. Aufgrund der hohen Dynamik in der technologischen Entwicklung automatisierter Fahrzeuge sowie entsprechend auch bezüglich der Weiterentwicklung der Ansätze für die differenzierten Analysen besteht jedoch zukünftig umfassender Forschungsbedarf. Interessant wäre in zukünftigen Studien ebenso eine Anwendung der differenzierten räumlichen Analysen mit den obigen vorgeschlagenen Weiterentwicklungen für andere europäische Städte, insbesondere aber speziell auch für weniger historisch gewachsene US-amerikanische Städte, und ein entsprechender Vergleich der Ergebnisse.

9. Literaturverzeichnis

Abegg, C., Girod, C., Fischer, K., Pahud, N., Raymann, L., Perret, F. (2018). Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag –Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz. EBP Schweiz AG. Zürich.

Agora Verkehrswende (2020): Die Automatisierung des Automobils und ihre Folgen. Chancen und Risiken selbstfahrender Fahrzeuge für nachhaltige Mobilität. Berlin. In: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2020/Automatisierung_des_Automobils/Agora_Verkehrswende_Automatisierung_des_Automobils_und_ihre_Folgen.pdf (22.08.2021)

Alessandrini, A., Campagna, A., Delle Site, P., Filippi, F., Persia, L. (2015): Automated Vehicles and the Rethinking of Mobility and Cities. Transportation Research Procedia 5, 145–160.

Altenburg, S., Kienzler, H.P., Auf der Maur, A. (2018). Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte. Auswirkungen auf Bestand und Sicherheit. Prognos. Berlin. In: https://www.adac.de/-/media/pdf/motorwelt/prognos_automatisierungsfunktionen.pdf (15.06.2021)

AustriaTech (2019): Automatisierte Mobilität in Österreich. Monitoring Bericht 2018. Wien. In: <https://austriatech.at/assets/Uploads/Publikationen/PDF-Dateien/7c53ca1c85/Automatisierte-Mobilitat-in-Osterreich-WEB.pdf> (13.06.2021)

Axhausen, K. W., Ehreke, I., Glemser, A., Hess, S., Jödden, C., Nagel, K. (2016): Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung. Schlussbericht: FE-Projekt-Nr. 96.996/2011.

Axhausen, K.W., Livingston, C., Hörl, S., Bruns, F., Fischer, R., Tasnády, B. (2020): Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 2; Verkehrliche Auswirkungen und Infrastrukturbedarf. ASTRA – Bundesamt für Strassen.

Baier, R. (1992): Verträglichkeit des Kraftfahrzeugverkehrs in Straßenräumen und Straßennetzen – Praxisorientiertes Verfahren in der Verkehrsentwicklungsplanung“, in Internationales Verkehrswesen 10, 395–399.

Baier, R., Hebel, C., Jachtmann, Y., Reinartz, A., Schäfer, K.H., Warnecke, A. (2011): Stadt Mönchengladbach. Untersuchungen zur Verkehrsentwicklungsplan. BSV – Büro für Stadt- und Verkehrsplanung Reinhold Baier, Aachen. In: <https://tinyurl.com/yaqvgpwk>

Beiker, S. (2015): Einführungsszenarien für höhergradig automatisierte Straßenfahrzeuge. In: Maurer M., Gerdes J., Lenz B., Winner H. (Hg.): Autonomes Fahren. Springer. Berlin, Heidelberg. S. 197-217.

Beiker, S. (2019): Deployment of automated driving as an example for the San Francisco Bay area. In: Meyer, G. & Beiker, S. (Hg.): Road Vehicle Automation 5. Springer, Cham. S. 117-129.

Bertolini, L. (2012): Integrating Mobility and Urban Development Agendas – A Manifesto. *disP – The Planning Review* 48(1), S. 16–26.

Bertolini, L. (2017): *Planning the Mobile Metropolis: Transport for People, Places and the Planet*. London: Palgrave/Red Grove Press.

Bmvit - Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2018): Aktionspaket Automatisierte Mobilität 2019-2022. Wien. In: https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:c6bff4ce-45e0-48ae-b415-1afa08849874/automatisiert2019_ua.pdf (13.06.2021)

Bösch, P. M. (2018): *Autonomous Vehicles – The next Revolution in Mobility*. Dissertation. ETH Zürich. Zürich.

Borchert, A. (2006): Geographische Informationssysteme für die Immobilienwirtschaft. *STANDORT – Zeitschrift für angewandte Geographie* 3/2006, S. 127-131.

Bormann, R., Fink, P., Holzapfel, H., Rammler, S., Sauter-Servaes, T., Tiemann, H., Waschke, T., Weirausch, B. (2018): Die Zukunft der deutschen Automobilindustrie. Transformation by Disaster oder by Design? *WISO Diskurs* 03/2018. Friedrich-Ebert-Stiftung

Buck, C., & Tkaczick, T. (2014): Geographische Informationssysteme. Walkability. *Das Handbuch zur Bewegungsförderung in der Kommune*, S. 165-177.

Brenner, W. & Herrmann, A. (2018): An Overview of Technology, Benefits and Impact of Automated and Autonomous Driving on the Automotive Industry. In: Lindhoff-Popien, C., Schneider, R., Zaddach, M. (Hg.): *Digital Marketplaces Unleashed*. Springer. Wiesbaden. S. 427-442.

BSI – British Standards Institution (2020): *Operational Design Domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS) – Specification*. PAS 1883. London.

Bühlmann, F. & Laube, M. (2013): *Verträglichkeit Strassenraum. Methodik und Ergebnisse*, hg. v. Kanton Zürich. Zürich: Amt für Verkehr. <https://tinyurl.com/y7nou6qc> (4.5.2020).

Campbell, M., Egerstedt, M., How, J.P., Murray, R.M. (2010): Autonomous driving in urban environments: approaches, lessons and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 368, S. 4649-4672.

Czarnecki, K. (2018): *Operational Design Domain for Automated Driving Systems. Taxonomy of Basic Terms*, Waterloo Intelligent Systems Engineering (WISE) Lab, University of Waterloo, Canada.

de Correia, G. H., Loeff, E., van Cranenburgh, S., Snelder, M., van Arem, B. (2019): On the impact of vehicle automation on the value of travel time while performing work and leisure activities in a car: Theoretical insights and results from a stated preference survey. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 119, S. 359-382.

Deng, T. (2013): Impacts of transport infrastructure on productivity and economic growth: Recent advances and research challenges. *Transport Reviews* 33(6), S. 686-699.

Dickmanns, E.D. (2002): The development of machine vision for road vehicles in the last decade. In: *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, S. 268-281. New York.

ERTRAC (2019). *Connected Automated Driving Roadmap 2019. Version 8*. In: <https://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id57/ERTRAC-CAD-Roadmap-2019.pdf> (16.06.2021)

Europäische Kommission (2016): *A European strategy on Cooperative Intelligent Transport Systems, a milestone towards cooperative, connected and automated mobility*. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/com20160766_en.pdf (18.03.2021)

Favarò, F.M., Eurich, S., Nader, N. (2018): Autonomous vehicles' disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations. *Accident Analysis Prevention* 110, S. 136–148.

Feak, C. B. & Swales, J. M. (2009): *Telling a Research Story: Writing a Literature Review*. Ann Arbor, Michigan, USA: University of Michigan Press.

Fernald, J. G. (1999): Roads to prosperity? Assessing the link between public capital and productivity. *American Economic Review* 89(3), S. 619–638.

FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen – RAS 06*. Köln: FGSV Verlag.

Fraedrich, E. (2017): *Autonomes Fahren. Individuelle und gesellschaftliche Aspekte der Akzeptanz*. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin. Berlin.

Frehn, M., Steinberg, Schröder, S. (2013): *Methodik und Ergebnisse der Straßenraumverträglichkeit. Verkehrsentwicklungsplan Bremen 2025*. In: www.bau.bremen.de/sixcms/media.php/13/130228_E03_Strassenraumvertraeglichkeit_Methodik_Ergebnisse.pdf (5.5.2020).

Friedrich, M., & Hartl, M. (2016): *Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs. Schlussbericht MEGAFON*. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen.

Fugmann, F., Karow-Kluge, D., Selle, K., Kuder, T. (2017). Öffentliche Räume in stadtgemeinschaftlich vielfältigen Quartieren: Nutzung, Wahrnehmung und Bedeutung. Aachen. In: https://www.vhw.de/fileadmin/user_upload/08_publicationen/vhw-schriftenreihe-

tagungsband/PDFs/vhw_Schriftenreihe_Nr._7_OEeffentliche_Raeume_in_stadtgesellschaftlich_vielfaeltigen_Quartieren_Juli_2017.pdf (13.06.2021)

Gehl Architects (2009): Downtown Seattle: Public Spaces & Public Life. City of Seattle. In: www.seattle.gov/Documents/Departments/SDCI/Codes/PublicSpacesLifeIntro.pdf (13.06.2021)

Gruber, C.J., Flucher, S., Eisenberger, I., Sammer, G., San Nicolás (2018). Forschungsprojekt AUTO-NOM. Analyse, Evaluierung und Anforderungen an innovative Anwendungen von autonomen Fahrzeugen aus verkehrspolitischer Sicht. Teil 1: Verkehrliche Auswirkungen und verkehrspolitische Aussagen. Wien. In: https://mobilitaetderzukunft.at/resources/pdf/projektberichte/AUTO-NOM_2017_Teil1_Verkehrliche_Auswirkungen_und_verkehrspolitische_Aussagen_1101.pdf (19.06.2021)

Häfliger, R., Bubenhofer, J., Hagedorn, C., Zweibrücken, K., Condrau, S., Baier, R. (2015): Verträglichkeitskriterien für den Strassenraum innerorts. Forschungsprojekt SVI 2004/058 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI). Zürich: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).

Harb, M., Stathopoulos, A., Shifan, Y., Walker, J. L. (2021): What do we (Not) know about our future with automated vehicles? Transportation research part C: emerging technologies, 123, 102948.

Hawkins, A. J. (2021): Cruise acquires Voyage in another autonomous vehicle merger. The Verge. In: <https://www.theverge.com/2021/3/15/22331794/cruise-acquires-voyage-self-driving-car-merger> (07.05.2021)

Hörl, S., Becker, F., Dubernet, T., Axhausen, K. W. (2019). Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung. Forschungsprojekt SVI 2016/001 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI). Bundesamt für Strassen. In: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/1401-1500/ab1433.pdf> (18.08.2021)

Horni, A.; Nagel, K.; Axhausen, K.W. (2016): The Multi-Agent Transport Simulation MATSim; Ubiquity: London, Vereinigtes Königreich.

ITF – International Transport Forum (2015): Urban Mobility System Upgrade-How Shared Self-Driving Cars Could Change City Traffic. Paris, Frankreich.

Kagermeier, A. (1997): Siedlungsstruktur und Verkehrsmobilität. Eine empirische Untersuchung am Beispiel von Südbayern. Dortmund: Dortmunder Vertrieb für Bau- und Planungsliteratur.

Kasraian, D., Maat, K., Stead, D., van Wee, B. (2016): Long-term impacts of transport infrastructure networks on land-use change: An international review of empirical studies. Transport Reviews 36(6), S. 772–792.

Kelly, C. E., Tight, M. R., Hodgson, F. C., Page, M. W. (2011): A comparison of three methods for assessing the walkability of the pedestrian environment. *Journal of Transport Geography*, 19(6), S. 1500-1508.

Klatt, F. (2019): Was ist ein Systematic Literature Review? In: https://www.dbwm.tu-berlin.de/menue/fuer_forschende_lehrende/methode_systematic_literature_review/ (05.04.2021)

Kolarova, V., Steck, F., & Bahamonde-Birke, F. J. (2019): Assessing the effect of autonomous driving on value of travel time savings: A comparison between current and future preferences. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 129, S. 155-169.

Lamnek, S. (2010): *Qualitative Sozialforschung*. 5. Auflage. Weinheim: Beltz Verlagsgruppe.

Kyriakou, K., Resch, B., Sagl, G., Petutschnig, A., Werner, C., Niederseer, D., Liedlgruber, M., Wilhelm, F.H., Osborne, T., Pykett, J. (2019): Detecting moments of stress from measurements of wearable physiological sensors. *Sensors*, 19(17), 3805.

Le Vine, S., Zolfaghari, A., Polak, J. (2015): Autonomous cars: The tension between occupant experience and intersection capacity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52, S. 1-14.

Madadi, B., van Nes, R., Snelder, M., van Arem, B. (2020): A bi-level model to optimize road networks for a mixture of manual and automated driving: An evolutionary local search algorithm. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(1), S. 80-96.

Madadi, B., van Nes, R., Snelder, M., van Arem, B. (2021). Multi-stage optimal design of road networks for automated vehicles with elastic multi-class demand. *Computers and Operations Research* 136, 105483.

Marshall, S. (2005): *Street & Patterns*. London: Spon Press.

McShane, C. (1994): *Down the asphalt path: The automobile and the American city*. New York: Columbia University Press.

Milakis, D., van Arem, B., van Wee, B. (2017): Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems* 21(4). S. 324-348.

Mitteregger, M., Bruck, E., Soteropoulos, A., Stickler, A., Berger, M., Dangschat, J.S., Scheuven, R., Banerjee, I. (2020): *AVENUE21. Automatisierter und vernetzter Verkehr: Entwicklungen des urbanen Europa*. Wiesbaden: Springer.

Moreno, A. T. (2017): Autonomous vehicles: Implications on an integrated land-use and transport modelling suite. Präsentation im Rahmen der 11. AESOP Young Academics Konferenz, 10. bis 13. April. München.

Moura, F., Cambra, P., Gonçalves, A. B. (2017): Measuring walkability for distinct pedestrian groups with a participatory assessment method: A case study in Lisbon. *Landscape and Urban Planning*, 157, S. 282-296.

Müller, P., Collin, H.-J., Ratschow, A., Rührich, W. (1994): Das LADIR-Verfahren zur Bestimmung stadtverträglicher Belastungen durch Autoverkehr. Schlussbericht zum Forschungsprojekt des Forschungsfeldes „Städtebau und Verkehr“ im Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Darmstadt/Braunschweig.

Narayanan, S., Chaniotakis, E., Antoniou, C. (2020): Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, S. 111, 255-293.

NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration (2017): Automated Driving Systems 2.0. A Vision for Safety. In:
https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/13069a-ads2.0_090617_v9a_tag.pdf (16.03.2021)

Nielsen, T. A. S., & Skov-Petersen, H. (2018): Bikeability–Urban structures supporting cycling. Effects of local, urban and regional scale urban form factors on cycling from home and workplace locations in Denmark. *Journal of Transport Geography*, 69, S. 36-44.

Perret, F., Bruns, F., Raymann, L., Hofmann, S., Fischer, R., Abegg, C., de Haan, P., Straumann, R., Heuel, S., Deublein, M., Willi, C. (2017): Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz. Zürich: EBP. Basler Fonds.

Pyrialakou, V. D., Gkartzonikas, C., Gatlin, J. D., Gkritza, K. (2020): Perceptions of safety on a shared road: Driving, cycling, or walking near an autonomous vehicle. *Journal of safety research*, 72, S. 249-258.

Rentschler, C., Herrmann, L., Kurth, D., Manz, W., Rumberg, M. (2020): Technische und rechtliche Systemgrenzen in der Routenplanung autonomer Shuttlebusse. In: Proff, H. (Hg.): *Neue Dimensionen der Mobilität. Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*. . Wiesbaden: Springer Gabler. S. 319-331.

Ritz, J. (2018): *Mobilitätswende – autonome Autos erobern unsere Straßen. Ressourcenverbrauch, Ökonomie und Sicherheit*. Wiesbaden: Springer.

SAE International (2018): *Surface vehicles recommended practice. J3016. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, Warrendale, USA.

Schieben, A., Wilbrink, M., Kettwich, C., Madigan, R., Louw, T., Merat, N. (2019): Designing the interaction of automated vehicles with other traffic participants: design considerations based on human needs and expectations. *Cognition, Technology & Work*, 21(1), S. 69-85.

Schmitz, S. (2001): Revolutionen der Erreichbarkeit. *Gesellschaft, Raum und Verkehr im Wandel, Stadtforschung aktuell*, Band 83. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Schuh, G., Zeller, P., Scholz, P., Krebs, L., Studerus, B. (2019): Eine Branche im Umbruch – Den technologischen Wandel in der Automobilindustrie gestalten. Whitepaper Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie. Aachen. In: <https://www.ipt.fraunhofer.de/content/dam/ipt/de/documents/whitepaper/Whitepaper-Eine-Branche-im-Wandel-Automobilindustrie.pdf> (01.03.2021)

Shladover, S. E. (2018): Connected and automated vehicle systems: Introduction and overview. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 22(3), S. 190-200.

Soteropoulos, A., Stickler, A., Sodl, A., Berger, M., Dangschat, J.S., Pfaffenbichler, P., Emberger, G., Frankus, E., Braun, R., Schneider, F., Kaiser, S., Walkobinger H., Mayerthaler, A. (2019). SAFiP – Systemszenarien Automatisiertes Fahren in der Personenmobilität. Endbericht. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien.

Soteropoulos, A. (2021): Automated Drivability und straßenräumliche Verträglichkeit im Stadt-Land-Kontinuum am Beispiel der Stadtregion Wien. In: Mitteregger, M., Bruck, E.M., Soteropoulos, A., Stickler, A., Berger, M., Dangschat, J.S., Scheuven, R., Banerjee, I. (Hg.): AVENUE21. Politische und planerische Aspekte der automatisierten Mobilität. Wiesbaden: Springer. S. 41-74.

SmartBus (2021). Førerløse busser i Aalborg Øst. In: <https://smartbus.dk/> (18.08.2021)

Sturma, A., Ritschl, V., Dennhardt, S., Stamm, T. (2016): Reviews. In: Ritschl, V., Weigl, R., Stamm, T. (Hg.): *Wissenschaftliches Arbeiten und Schreiben. Verstehen, Anwenden, Nutzen für die Praxis*. Berlin/Heidelberg: Springer.

Stopher, P.R., Magassy, T.B., Pendyala, R.M., McAslan, D., Arevalo, F.N., Miller, T. (2021). An Evaluation of the Valley Metro–Waymo Automated Vehicle RideChoice Mobility on Demand Demonstration. Final Report. FTA Report No. 0198. Federal Transit Administration. In: <https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/2021-08/FTA-Report-No-0198.pdf> (02.09.2021)

Su, S., Zhou, H., Xu, M., Ru, H., Wang, W., Weng, M. (2019): Auditing street walkability and associated social inequalities for planning implications. *Journal of transport geography*, 74, S. 62-76.

Teoh, E.R. & Kidd, D.G. (2017). Rage against the machine? Google's self-driving cars versus human drivers. *Journal of Safety Research* 63, S. 57-60.

Thorn, E., Kimmel, S., Chaka, M. (2018): A Framework for Automated Driving System Testable Cases and Scenarios. Report: DOT HS 812 623. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Washington, DC.

TrafiCity (2020): auto.Waves: Autonomes Fahren—Wirkungsanalyse Verkehr, Energie und Stadt für den Raum Wien. Wiener Linien, Wiener Lokalbahnen, TU Graz Forschungsbericht. Wien.

Umweltbundesamt (2015): Gerechtigkeit im Umweltrecht. Texte 73/2015. In: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_73_2015_gerechtigkeit_im_umweltrecht.pdf (22.08.2021)

Van Wee, B. & Banister, D. (2015): How to Write a Literature Review Paper? Transport Reviews 36(2), S. 278-288.

VCÖ – Verkehrsclub Österreich (2016): Verkehrssystem sanieren für die Zukunft. Wien. In: <https://radkompetenz.at/wp-content/uploads/2021/03/2016-04-VCOe-Publikation-Verkehrssystem-sanieren-fuer-die-Zukunft.pdf> (22.08.2021)

VDA – Verband der Automobilindustrie (2015): Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. Berlin. In: <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf> (24.03.2021)

Von Mörner, J., Müller, P., Topp, H. (1984): Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Entwurf und Gestaltung innerörtlicher Strassen, Bericht 425 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bonn: Bundesministerium für Verkehr.

Waymo (2020): Waymo Safety Report. September 2020. In: <https://storage.googleapis.com/sdc-prod/v1/safety-report/2020-09-waymo-safety-report.pdf> (16.03.2021)

Wegener, M., & Fürst, F. (1999): Land-Use Transport Interaction – State of the Art. Berichte aus dem Institut für Raumplanung 46. Technische Universität Dortmund. Dortmund.

Wiener Linien (2021). Autonomer Bus – Seestadt. In: <https://www.wienerlinien.at/web/wiener-linien/auto-bus-seestadt> (18.08.2021)

Winters, M., Brauer, M., Setton, E. M., Teschke, K. (2013): Mapping bikeability: a spatial tool to support sustainable travel. Environment and Planning B: Planning and Design, 40(5), S. 865-883.

Ye, Y., Zeng, W., Shen, Q., Zhang, X., Lu, Y. (2019): The visual quality of streets: A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 46(8), S. 1439-1457.

Ziegler, J., Bender, P., Lategahn, H., Schreiber, M., Strauss, T., Dang, T., Stiller, C. (2014): Kartengestütztes automatisiertes Fahren auf der Bertha-Benz-Route von Mannheim nach Pforzheim. In: 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme, S. 79-64. Walting.

Zhang, W. (2017): The interaction between land use and transportation in the era of shared autonomous vehicles: A simulation model. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.