



**Universität
Zürich^{UZH}**

Abschlussarbeit

zur Erlangung des
Master of Advanced Studies in Real Estate

Der Einfluss autonomer Fahrzeuge auf die Bevölkerungsverteilung zwischen Stadt und Peripherie: Fallbeispiel Schweiz

Verfasserin:

Rotermund

Myra

Dolderstrasse 4, 8032 Zürich, Schweiz

mr@rotermund.ch

+41 (0)76 524 16 25

Eingereicht bei:

Prof. Kay W. Axhausen

Abgabedatum:

28.08.2017, revidierte Version 24.04.2018

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis.....	X
Executive Summary.....	XI
1. Einleitung	1
1.1 Ausgangslage	1
1.1.1 Äquivalent von 10 Jahren Infrastrukturausbau-Investitionen	1
1.1.2 Induzierte Verkehrsnachfrage.....	1
1.1.3 Verstärkte Zersiedelung.....	2
1.1.4 Senkung der allgemeinen Mobilitätskosten.....	2
1.1.5 Neudefinition des öffentlichen Verkehrs.....	2
1.1.6 Bodenpreis	2
1.1.7 Massgeschneiderte Mobilität für alle	3
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Methode: Simulationstool.....	3
1.4 Inhaltliche Abgrenzung.....	4
1.5 Aufbau	4
2. Theoretische Grundlagen.....	6
2.1 Grundlagen automatisierte Fahrzeuge	6
2.1.1 Definition und Anwendung: Autonome und automatisierte Fahrzeuge	6
2.1.2 Anwendungsbereiche autonomer Fahrzeuge	6
2.1.3 Entwicklungsstand automatisierte Fahrzeuge	7
2.1.4 Automatisierung und Vernetzung.....	7
2.1.5 Interpretation von und Umgang mit komplexen Umgebungen und Situationen.....	8
2.1.6 Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmenden	8
2.1.7 Zeitpunkt der Implementierung	9

2.2	Raumwirksame Effekte autonomer Fahrzeuge	10
2.2.1	Autonome Fahrzeuge sind günstiger	10
2.2.2	Autonome Fahrzeuge sind sicherer	12
2.2.3	Autonome Fahrzeuge sind komfortabler	12
2.2.4	Autonome Fahrzeuge stehen allen Personen offen.....	13
2.2.5	Autonome Fahrzeuge führen zu mehr Verkehr	13
2.3	Allgemeine verkehrliche Grundlagen	14
2.3.1	Was ist Erreichbarkeit / Potentialansatz	14
2.3.2	Strassenkapazität	15
2.3.3	Auslastung des Verkehrsnetzes	16
2.3.4	Rentabilität des öffentlichen Verkehrs	16
2.3.5	Generalisierte Kosten des Verkehrs	18
2.3.6	Induzierte Nachfrage	18
2.3.7	Erreichbarkeitstopographie der Schweiz für MIV und ÖV.....	18
2.4	Zusammenhang von Erreichbarkeit und Raumentwicklung.....	20
2.4.1	Ziel und Grundlagen des Modells	20
2.4.2	Erreichbarkeit als Potential.....	20
2.4.3	Empirische Bestätigung	21
2.5	Sprawl	22
2.5.1	Relevanz, Definition	22
2.5.2	Ursache, Entstehung	22
2.5.3	Sprawl in der Schweiz	23
2.5.4	Trend zurück ins Zentrum	23
2.5.5	Mehr Sprawl wegen autonomer Fahrzeuge	23
3.	Forschungsfrage und Methode	24
3.1	Zwischenfazit: Potential autonomer Fahrzeuge in peripheren Lagen.....	24
3.2	Forschungsfrage	24
3.3	Wahl der Variable	24

3.4	Messen der Auswirkungen.....	25
3.5	Arbeit in Szenarien	25
3.6	Kausalität	25
3.7	Beschrieb des Simulations-Werkzeugs FaLC.....	26
3.7.1	Was ist FaLC?	26
3.7.2	Ziel und Zweck von FaLC.....	26
3.7.3	Vergleichbare Landnutzungsmodelle und Validierung FaLC.....	26
3.8	Grundprinzipien FaLC	27
3.8.1	Raum.....	27
3.8.2	Synthetische Population und Agenten.....	29
3.8.3	Agenten und Agenten-Aggregate	29
3.8.4	Mobilität der Agenten-Aggregate.....	30
3.8.5	Zeitraum	30
3.8.6	Interaktion Verkehr und Nutzer.....	30
3.9	Ablauf einer Simulation in FaLC.....	31
3.9.1	Basismodelle.....	31
3.9.2	Das Grundprinzip der jährlichen Zyklen	32
3.10	Validierung Resultate in FaLC.....	33
3.10.1	Validierung Resultate retrospektiv	33
3.10.2	Validierung von in der Zukunft liegenden Resultaten.....	33
3.11	Statistische Güte von FaLC.....	34
3.11.1	Determinationskoeffizient	34
3.11.2	Weisses Rauschen	35
4.	Beschrieb der Simulation: Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge	37
4.1	Inputdaten Erreichbarkeitswerte: Herkunft und Beschrieb	37
4.1.1	Grundlagen für Szenarien mit konservativer Kapazitätzunahme	37
4.1.2	Grundlagen für Szenarien mit hoher Kapazitätzunahme	37
4.1.3	Betrachtungszeitpunkt	38

4.1.4	Generalisierte Kosten	38
4.1.5	Szenario 1	38
4.1.6	Szenario 2	38
4.1.7	Szenario 3	38
4.1.8	Integrierung der Szenarien in FaLC	39
4.2	Szenarien in FaLC	39
4.2.1	Bezeichnung der Szenarien	39
4.2.2	Szenario 1 in Variante 1.1 und 1.2	39
4.2.3	Szenario 2 in Variante 2.1 und 2.2	39
4.2.4	Szenario 3 in Varianten 3.1 und 3.2	40
4.2.5	Subszenarien 3.2s, 3.2i, 3.2l	40
4.3	Technischer Beschrieb Implementierung Erreichbarkeitswerte in FaLC	42
4.3.1	Bedeutung der Erreichbarkeitswerte für die Wohnstandortwahl in FaLC	42
4.3.2	Ermittlung Standarderreichbarkeitswerte in FaLC	43
4.3.3	Modifikation der Erreichbarkeitswerte in FaLC mittels Skript	43
4.4	Konzept Analyse	44
4.4.1	Unterschiedliche Containergrößen	44
4.4.2	Vorgehen: Gliederung der Locations nach Raumkategorien	45
4.5	Technische Ausgangslage der Simulation	46
4.5.1	Statistik	46
4.5.2	Betrachtungszeitpunkt	46
4.5.3	Ausgangslage zum Startzeitpunkt: Technischer Beschrieb	47
5.	Resultate	48
5.1	Resultate Szenarien	49
5.1.1	Basisszenario	49
5.1.2	Szenarien 1.1, 1.2, 2.1 und 2.2	49
5.1.3	Szenarien 3.1 und 3.2	50
5.1.4	Subszenarien 3.2l, 3.2i und 3.2s	53

5.2	Diskussion.....	56
5.2.1	Methode	56
5.2.2	Resultate	56
5.2.3	Zeitlicher Rahmen und Alternative Betrachtungsweise	59
6.	Schlussbetrachtung	60
6.1	Zusammenfassung / Fazit	60
6.1.1	Forschungsstand	60
6.1.2	Simulation.....	60
6.2	Ausblick	61
6.2.1	Forschungsstand	61
6.2.2	Politische Dimension.....	61
6.2.3	Vertiefung der gewonnenen Erkenntnisse	61
	Literaturverzeichnis	62
	Anhang Nr. 1: Analyse der Multiplikatoren der für die Erreichbarkeitswerte in FaLC.	70
	Anhang Nr. 2: Skript autonome Fahrzeuge	72
	Anhang Nr. 3: Verhältnis Erreichbarkeitsveränderung zu Veränderung Personenzahl	73

Abkürzungsverzeichnis

ASTRA	Bundesamt für Strassen und Verkehr
AV	engl. <i>autonomous</i> oder <i>automated vehicle</i> ; autonomes oder automatisiertes Fahrzeug
BV	Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft
CAV	engl. <i>connected and autonomous vehicle</i> , vernetztes und autonomes Fahrzeug
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
FaLC	engl. <i>Facility Location Choice Simulation Tool</i> , integriertes Verkehrs- und Raumnutzungs-Simulationstool (engl. <i>tool</i> ; Werkzeug)
IVT	Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NPVM	Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK
ÖV	Öffentlicher Verkehr
RPG	Bundesgesetz über die Raumplanung (Raumplanungsgesetz)
SAE	Eng. <i>Society of Automotive Engineers</i> , Verband der Automobil-ingenieure
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Automatisierungsgrad von Fahrzeugen nach SAE J3916 (Stufen 0 - 5) kombiniert mit «Bestehenden und denkbaren zukünftige Entwicklungen im automatisierten Fahren“ (Bundesamt für Strassen ASTRA, 2016b, S. 34).....	7
Abbildung 2: Werbung von 1957 für “America’s Independent Electric Light and Power Companies”, Illustration von H. Miller. Begleittext im Original: <i>ELECTRICITY MAY BE THE DRIVER. One day your car may speed along an electric super-highway, its speed and steering automatically controlled by electronic devices embedded in the road. Highways will be made safe—by electricity! No traffic jams...no collisions...no driver fatigue.</i>	10
Abbildung 3: Kostenstrukturvergleich konventionelle und autonome Fahrzeuge (Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017, S. 16).....	11
Abbildung 4: Orte (rot), an denen Pendler an einem Dienstagmorgen bei Abfahrt um 07:15 Uhr vom Stau betroffen sind, pro km ² (Credit Suisse, 2014, Titelseite).....	16
Abbildung 5: Erreichbarkeit (als Potential) mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) 2005 (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2010a, S. 23).....	19
Abbildung 6: Erreichbarkeit (als Potential) mit dem öffentlichen Verkehr (ÖV) 2005 (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2010a, S. 22).....	19
Abbildung 7: Modell des Agentenverhaltens in FaLC (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b).....	27
Abbildung 8: Unterschiede zwischen den Zonen des nationalen Personenverkehrsmodells ² und den Gemeinden, Stand 2010. (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 10).....	28
Abbildung 9: Jährliche Basismodelle (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b, S. 5).....	31
Abbildung 10: Vergleich der in FaLC errechneten Werte (Y-Achse) mit den Werten des Bundesamts für Statistik BFS (X-Achse) für das Jahr 2010 (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 36).....	34
Abbildung 11: Weisses Rauschen in FaLC in Abhängigkeit der Anzahl paralleler Läufe (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2017 forthcoming, S. 175)	36
Abbildung 12: Anzahl Locations (y) nach Bevölkerungsgrösse (x), Basisszenario 2024	44
Abbildung 13: Kategorisierung der Schweizer Gemeinden nach städtisch (rot), intermediär (gelb) und ländlich (grün) (Bundesamt für Statistik BFS, 2017, S. 14).....	45

Abbildung 14: Veränderungen in Personen zum Basisszenario nach Szenario. Bevölkerungsstand: 31.12.2024	48
Abbildung 15: Konservatives Szenario, Erreichbarkeitsveränderungen, Meyer et al. (2017, S. 8)	51
Abbildung 16: Hohes Szenario, Erreichbarkeitsveränderungen, Meyer et al. (2017, S. 8)	51
Abbildung 17: Szenario 3.2 (blasse Kolorierung) und Subszenarien 3.2s, 3.2i und 3.2l (kräftige Kolorierung), Bevölkerungsstand: 31.12.2024.....	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Preise nach Fahrzeugtyp (Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017, S. 19, Tabelle 3).....	11
Tabelle 2: Kosten für konventionelles Verkehrsangebot	12
Tabelle 3: Methoden der Basismodelle in FaLC (Grundlage: Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 6).....	32
Tabelle 4: Determinationskoeffizient (R^2) der Einwohner und Angestellten der Schweiz nach einer FaLC-Simulation von 2000-2010 im Vergleich zu den offiziellen Daten des Bundesamts für Statistik (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 35)	34
Tabelle 5: Verfügbare Bauzonenflächen für Wohnzwecke nach Kategorie (Ausgangslage).....	41
Tabelle 6: Modifizierte Bauzonenflächen für Wohnzwecke nach Kategorie.....	41
Tabelle 7: Zeitliches Setting der Simulation	46
Tabelle 8: Ausgangslage zum Startzeitpunkt der Simulation.....	47
Tabelle 9: Basisszenario, Bevölkerungsverteilung am 31.12.2024.....	49
Tabelle 10: Szenarien 1.1, 1.2, 2.1 und 2.2: Differenz Bevölkerungsverteilung zum Basisszenario am 31.12.2024	49
Tabelle 11: Szenarien 3.1, 3.1 <i>nur Bahnhof</i> und 3.2: Differenz Bevölkerungsverteilung zum Basisszenario am 31.12.2024	50
Tabelle 12: Szenario 3.1: Beitrag Erschliessungsgüte ÖV.....	52
Tabelle 13: Szenario 3.2: Beitrag Erschliessungsgüte ÖV	52
Tabelle 14: Differenzen der Resultate der Subsznarien zu Szenario 3.2, Bevölkerungsstand: 31.12.2024	53
Tabelle 15: Zusammenstellung aller Resultate, Bevölkerungsstand 31.12.2024.....	55
Tabelle 16: Resultierender Überschuss Bauzonenvergrößerung städtischer Locations	58

Executive Summary

Autonome Fahrzeuge haben das Potential, das Konzept und die Struktur von Mobilität, wie wir sie heute kennen, massgeblich zu verändern. Die Forschung konnte bereits aufzeigen, dass autonome Fahrzeuge Mobilitätsdienstleistungen günstiger, sicherer und komfortabler bereitstellen können, als der konventionelle motorisierte Individualverkehr (MIV) und der öffentliche Verkehr (ÖV) dies heute vermögen. Ferner steht die Nutzung autonomer Fahrzeuge allen Personen unabhängig des Alters offen, auch jenen, die heute aus verschiedenen Gründen über keine Fahrerlaubnis verfügen.

Die Auswirkungen dieser neuen Möglichkeiten sind vielseitig, oft noch wenig erforscht und überschreiten den Rahmen der vorliegenden Untersuchung. Der Inhalt der vorliegenden Arbeit ist daher auf räumliche Auswirkungen fokussiert.

Die Auswirkungen werden mittels eines integrierten Verkehrs- und Raumnutzungssimulationstools namens *FaLC* simuliert. Dafür wird die räumliche Schweiz inkl. Verkehr und Bevölkerung abgebildet. Darauf aufbauend werden raumwirksame Szenarien, die unterschiedliche Annahmen und Zustände hinsichtlich der Einführung und der Nutzung autonomer Fahrzeuge abbilden, an Hand von Modellen oder Annahmen getestet. *FaLC* verwendet den Ansatz der Mikrosimulation, d. h. alle Entscheidungen und alle Bewegungen finden auf Ebene von einzelnen Personen (Agenten) statt. Dabei werden auch die Wechselwirkungen zwischen Bautätigkeit, Migrationen, Pendlerbeziehungen, Verkehrsentwicklung und weiteren exogenen Faktoren berücksichtigt.

Die Simulation zeigt schliesslich auf, wie sich die Bevölkerung je nach Annahme nach einem Untersuchungszeitraum von 10 Jahren unterschiedlich räumlich verteilt. Die Verteilung wird anhand der drei Raumkategorien der neuen *Stadt-/Landtypologie 2012*¹, städtisch, ländlich oder intermediär (dazwischenliegend), analysiert. Damit können die Nachfragetendenzen unter Annahme des Vorhandenseins autonomer Fahrzeuge für die verschiedenen Raumkategorien aufgezeigt werden.

Die unterschiedlichen Ausgangslagen, die in *FaLC* getestet werden, sind in Szenarien zusammengefasst: Das erste Szenario beruht auf der Annahme, dass autonome Fahrzeuge nur ausserorts zugelassen sind. Um sie zu bedienen, ist weiterhin ein Führerausweis nötig. Damit wird ein Zwischenstand abgebildet, in dem autonome Fahrzeuge für

¹ Gemeindetypologie und Stadt/Land-Typologie 2012 (Bundesamt für Statistik BFS, 2017)

komplexere Situationen innerorts, mit hoher Interaktionsdichte, noch keine Zulassung haben.

Das zweite Szenario beruht der Annahme, dass autonome Fahrzeuge über eine Zulassung für das gesamte Strassennetz verfügen. Ein Führerausweis wird nicht mehr benötigt, somit steht das Angebot allen Menschen uneingeschränkt offen.

Für das dritte Szenario wird angenommen, dass sich die Fahrzeuge nicht mehr in Privatbesitz befinden, sondern Bestandteil einer autonomen, geteilten Flotte sind. Diese Annahme hat, anders als die vorhergehenden, auch massgeblichen Einfluss auf das bestehende Konzept des öffentlichen Verkehrs. Diesem Sachverhalt wird mit einigen zusätzlichen Eingriffen Rechnung getragen. Anhand des dritten Szenarios wird ausserdem ein Subszenario mit modifizierten Bauzonen getestet.

Auf technischer Ebene beruhen die Eingriffe für alle Szenarien auf dem Abbilden von veränderten Erreichbarkeitswerten in FaLC. Grundlage dieser Werte bildet eine Untersuchung zu den *Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge* von Meyer, Bösch, Becker & Axhausen (2016). Die weiteren Eingriffe für das dritte Szenario beruhen auf Anpassungen, welche die Abbildungsstruktur des öffentlichen Verkehrs im Simulationsstool betreffen und nötig sind, um das Szenario schlüssig darzustellen.

Die Resultate bestätigen das raumwirksame Potential autonomer Fahrzeuge insbesondere für das dritte Szenario (autonome, geteilte Flotte). Sie zeigen, dass eine räumliche Umverteilung weg von städtischen, hin zu ländlichen und intermediären Gebieten stattfindet. Das Subszenario mit den modifizierten Bauzonen zeigt auf, dass Agenten städtisches Bauland bevorzugt nachfragen. Die Nachfrage übersteigt das bestehende Angebot.

Der Beitrag der veränderten Erreichbarkeitswerten zu den Resultaten unter der bestehenden Gewichtung in FaLC reicht nicht aus, um klare Tendenzen aufzuzeigen. Dies betrifft insbesondere das erste und zweite Szenario, welche ausschliesslich auf diesem Eingriff beruhen. Die Variable hatte trotz Veränderungen von bis +30%, nicht genug Gewicht in der Nutzenfunktion für den Umzugsentscheid. Es bedarf folglich weiterer Untersuchungen, um den Effekt der veränderten Erreichbarkeitswerte eindeutig erfassen zu können.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Auf technischer Ebene ist die Forschung zu autonomen Fahrzeugen soweit fortgeschritten, dass der Schweizer Bundesrat davon ausgeht, dass automatisierte² Fahrzeuge in den nächsten 15 bis 20 Jahren einen beträchtlichen Anteil der zugelassenen Strassenfahrzeuge ausmachen werden (Bundesamt für Strassen ASTRA, 2016a). Weitgehend offen ist hingegen, wie Gesellschaft, Politik und Wirtschaft mit der neuen Ausgangslage umgehen werden. Komplexe rechtliche und ethische Grundlagen müssen zuvor untersucht und verhandelt werden (Bundesamt für Strassen ASTRA, 2016b, S. 3).

In Hinblick auf die räumlichen Effekte autonomer Fahrzeuge zeichnet der aktuelle Stand der Forschung ein Bild von Chancen und Risiken, welches in den folgenden Absätzen kurz erläutert wird.

1.1.1 Äquivalent von 10 Jahren Infrastrukturausbau-Investitionen

Im Bericht *Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge* (Meyer, Bösch, Becker, & Axhausen, 2016, S. 10) konnte gezeigt werden, dass die direkten Erreichbarkeitswirkungen³ autonomer Fahrzeuge dem Äquivalent von 10 Jahren Infrastrukturausbau-Investitionen entsprechen. Dies obwohl [je nach Szenario, *Anm. d. Verf.*] die gesamte Nachfrage nach öffentlichem Verkehr (ÖV) auf die Strasse umgelegt worden ist und ohne dass Optimierungsmassnahmen, wie *Ride Sharing*, *Mobility Pricing* oder höhere Geschwindigkeiten implementiert wurden. (Meyer, Bösch, Becker, & Axhausen, 2016, S. 10)

1.1.2 Induzierte Verkehrsnachfrage

Als eine Folge erhöhter Erreichbarkeitswerte wird eine Zunahme der Verkehrsnachfrage erwartet (in Anlehnung an Glaeser & Kahn, 2004, S. 2511). Es ist noch nicht klar, ob die induzierte Nachfrage⁴ die erhöhten Erreichbarkeitswerte wieder kompensieren wird oder ob es sogar zu einer Überkompensation kommen könnte. In diesem Fall würden die Erreichbarkeitswerte wegen Überlastung des Strassennetzes wieder sinken. Abgeschwächt werden kann der Effekt durch Redimensionierung der Fahrzeuge (Meyer, Bösch, Becker, & Axhausen, 2016, S. 2). Das Thema wird in Abschnitt 2.2.5 *Autonome Fahrzeuge führen zu mehr Verkehr* vertieft.

² Siehe Abschnitt 2.1.1 *Definition und Anwendung: Autonome und automatisierte Fahrzeuge*

³ Siehe Abschnitt 2.3.1 *Was ist Erreichbarkeit / Potentialansatz*

⁴ Siehe Abschnitt 2.3.6 *Induzierte Nachfrage*

1.1.3 Verstärkte Zersiedelung

Die Resultate von Meyer (2016) zeigen ferner, dass «gut erschlossene, ländliche Gemeinden grosse Erreichbarkeitsgewinne aufweisen, während die Effekte in den Agglomerationen und Städten weniger stark oder sogar negativ sind.» (S. 10). In der Vergangenheit führten höhere Erreichbarkeitswerte dezentraler Gebiete zu verstärkter Zersiedelung. Siehe dazu Abschnitt 2.5 *Sprawl*. Die Korrelation von Erreichbarkeit und Raumentwicklung wird in Abschnitt 2.4 *Zusammenhang von Erreichbarkeit und Raumentwicklung* erläutert.

1.1.4 Senkung der allgemeinen Mobilitätskosten

Autonome Fahrzeuge haben insbesondere auf jenen Strecken, auf denen der öffentliche Verkehr wenig oder nicht rentabel ist, ein grosses Potential. Sie können ein massgeschneidertes Angebot zu günstigen Konditionen⁵ anbieten (Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017, S. 15-19). Autonome Fahrzeuge leisten damit einen Beitrag zur Senkung der allgemeinen Kosten. Die Kostenstruktur des öffentlichen Verkehrs wird unter Abschnitt 2.3.4 *Rentabilität des öffentlichen Verkehrs* vertieft.

1.1.5 Neudefinition des öffentlichen Verkehrs

Autonome Fahrzeuge haben das Potential, die Mobilität, wie wir sie heute kennen, grundlegend zu verändern. Die scharfe Trennung zwischen Individualverkehr und öffentlichem Verkehr, der nach Linie und Takt fährt, könnte bald Vergangenheit sein (Bundesamt für Strassen ASTRA, 2016b, S. 2). Bösch et al. (2017) konnten zeigen, dass eine Flotte autonomer Fahrzeuge, die auf Verlangen auf allen Strecken einen Tür-zu-Tür-Service anbietet, zu Preisen⁶ weit unter dem heutigen Niveau betrieben werden kann (S. 15-19). Die Kostenstruktur verschiedener autonomer Mobilitätskonzepte wird in Abschnitt 2.2.1 *Autonome Fahrzeuge sind günstiger* erläutert.

1.1.6 Bodenpreis

Volkswirtschaftlich relevant sind die Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge auch, weil die Erreichbarkeit einen direkten Einfluss auf den Bodenpreis hat. So ist im Kanton Zürich die Fahrzeit nach Zürich die mit Abstand wichtigste Einflussgrösse auf den Bodenpreis (Statistisches Amt Kanton Zürich, 2017, S. 1). Wird das Reisen angenehmer, weil sich die Insassen anderen Tätigkeiten als dem Bedienen des Fahrzeugs widmen

⁵ Siehe Abschnitt 2.2.1 *Autonome Fahrzeuge sind günstiger*

⁶ Siehe Abschnitt 2.2.1 *Autonome Fahrzeuge sind günstiger*

können, weil die die Parkplatzsuche entfällt oder weil die Ankunftszeit wegen Vernetzung von Fahrzeug und Infrastruktur viel genauer prognostiziert werden kann, darf in der Folge auch mit einem ein Einfluss auf die bisherige Pendelzeit von ca. 30 Minuten erwartet werden (Bundesamt für Statistik BFS, 2015, S. 4; Moser, 2007, S.131-139). In Abschnitt 2.2.3 *Autonome Fahrzeuge sind komfortabler* werden diese Annahmen vertieft.

1.1.7 Massgeschneiderte Mobilität für alle

Autonome Fahrzeuge stehen mit einem massgeschneiderten Mobilitätsangebot auch all jenen zur Verfügung, die heute aus rechtlichen, körperlichen oder anderen Gründen keine Fahrerlaubnis für motorisierten Individualverkehr haben: Kindern und Jugendliche unter 16/18 Jahren, Menschen mit Beeinträchtigungen oder ältere Menschen. Damit kann die Unabhängigkeit und Selbständigkeit hinsichtlich Mobilität erhöht resp. erhalten bleiben. Gleichzeitig wird durch die neuen Nutzergruppen eine Zunahme der Nachfrage nach Strassenkapazität⁷ erwartet (Fagant & Kockelmann, 2015, S. 170). Der Einfluss neuer Nutzer auf das Verkehrsaufkommen wird in Abschnitt 4.1.6 *Szenario 2* und in Abschnitt 4.1.7 *Szenario 3* erläutert.

1.2 Zielsetzung

Unter der Annahme, dass autonome Fahrzeuge einen relevanten Bestandteil des Verkehrs ausmachen, soll am Fallbeispiel Schweiz aufgezeigt werden, welchen Effekt die erhöhten Erreichbarkeitswerte und Folgeanpassungen auf die Verteilung der Bevölkerung haben. Anhand des Vergleichs der Bevölkerungsverteilung mit dem Basisszenario ohne autonomen Verkehr, soll abgelesen werden, welche Art von Siedlungsfläche, städtisch, ländlich oder dazwischenliegend (intermediär), bevorzugt nachgefragt wird.

1.3 Methode: Simulationstool

Die Untersuchung findet an Hand eines integrierten Verkehrs- und Raumnutzungs-Simulationstools (*Facility Location Choice Simulation Tool (FaLC)*) (engl. *tool*, Werkzeug) statt. Die detaillierte Beschreibung des Tools folgt unter Abschnitt 3.7 *Beschrieb des Simulations-Werkzeugs*.

⁷ Siehe Abschnitt 2.3.2 Strassenkapazität

1.4 Inhaltliche Abgrenzung

Die Simulation befasst sich ausschliesslich mit den direkten Erreichbarkeitswirkungen autonomer Landfahrzeuge auf dem Schweizer Strassennetz und, wenn nötig, auf Folgeanpassungen. Weitere räumliche Auswirkungen, wie beispielsweise die induzierte Nachfrage aus den erhöhten Erreichbarkeitswerten und deren Folgen werden nicht abgebildet.

1.5 Aufbau

Unter Kapitel 2 *Theoretische Grundlagen* werden zuerst die Grundlagen automatisierter Fahrzeuge behandelt, dann folgen die allgemeinen verkehrlichen Grundlagen. Anschliessend wird der Zusammenhang zwischen vollautomatisierten Fahrzeugen und der Raumentwicklung an Hand der Erreichbarkeit aufgezeigt. Im Anschluss folgt ein Abschnitt zum Thema Sprawl / Zersiedelung und der Bedeutung von autonomen Fahrzeugen für Sprawl.

Das dritte Kapitel betrifft die *Methode*: Es beginnt mit der Eingrenzung und der Forschungsfrage, anschliessend folgt der Konzeptbeschrieb der Untersuchung und zum Schluss wird das gewählte Simulationstools FaLC beschrieben.

Im vierten Kapitel

Beschrieb der Simulation: Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge folgt der detaillierte Beschrieb der Untersuchung: Herkunft der Inputdaten und deren Übersetzung und technische Implementierung in das Simulationstool FaLC. Anschliessend folgt das Analysekonzept. Es zeigt auf, wie die generierten Daten interpretiert werden sollen. Das Kapitel wird mit der Zusammenfassung der technischen Ausgangslage von FaLC zum Startzeitpunkt der Simulation abgeschlossen.

Unter Kapitel 5 befinden sich die Resultate und deren Einordnung. Anschliessend werden die Grenzen und Schwächen der gewählten Methode und der Resultate aufgezeigt.

Im sechsten Kapitel folgt die Schlussbetrachtung. Die Erkenntnisse werden zusammengefasst und ein Fazit gezogen. Das Kapitel wird mit dem Ausblick abgeschlossen.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Grundlagen automatisierte Fahrzeuge

2.1.1 Definition und Anwendung: Autonome und automatisierte Fahrzeuge

Zwischen den Begriffen «autonom» und «automatisiert» wird unterschieden. «Autonom» bezieht sich im Zusammenhang mit Fahrzeugen darauf, ob und wie stark ein Fahrzeug autonom, d.h. unabhängig, von einem Fahrer / einer Fahrerin operieren kann. «Automatisiert» wiederum gibt Auskunft darüber, ob und wie stark ein Fahrzeug mit technischen Systemen ausgerüstet ist, welche autonomes Operieren ermöglichen.

Alle Resultate der vorliegenden Untersuchung beruhen auf der Annahme, dass vollautonome und somit vollautomatisierte Fahrzeuge vorhanden sind.

«Vollautomatisiert» definiert die National Highway Traffic Safety Administration in Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles (National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2013, S. 5) wie folgt:

The vehicle is designed to perform all safety-critical driving functions and monitor roadway conditions for an entire trip. Such a design anticipates that the driver will provide destination or navigation input, but is not expected to be available for control at any time during the trip. This includes both occupied and unoccupied vehicles. By design, safe operation rests solely on the automated vehicle system.

Eine alternative Definition in Deutsch liefert das Bundesamt für Strassen ASTRA im Bericht *Automatisiertes Fahren – Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen* (SAE International, 2014; zit. in Bundesamt für Strassen ASTRA, 2016b, S. 33).

Auf dieser Stufe ist vom „Start“ bis zum „Ziel“ keine Fahrerin / kein Fahrer mehr notwendig. Das System übernimmt die Fahraufgabe vollumfänglich, d.h. bei allen Strassentypen, Geschwindigkeitsbereichen und Umfeldbedingungen.

2.1.2 Anwendungsbereiche autonomer Fahrzeuge

Autonome Fahrzeuge können nicht nur an Land, sondern auch unter Wasser als autonome U-Boote, unter Tag und in der Luft als Drohne zur Anwendung kommen. Ferner können autonome Landfahrzeuge nicht nur auf der Strasse, sondern auch im Gelände, beispielsweise für Landwirtschaft, Bergbau oder Freizeit verwendet werden. Ausserdem können autonome Fahrzeuge auch unbemannt unterwegs sein, beispielsweise um Fracht zu transportieren, Felder zu bestellen oder für Fahrten durch kontaminiertes oder unwirtliches Gebiet.

2.1.3 Entwicklungsstand automatisierte Fahrzeuge

SAE (SAE International, 2014) und die NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2013) unterscheiden mehrere Abstufungen des Automatisierungsgrads von Fahrzeugen. Die niedrigste Stufe steht für Fahrzeuge ohne Automatisierung, die höchste für vollautomatisierte Fahrzeuge. Abbildung 1 zeigt die Abstufungen nach SAE, wie sie auch das Bundesamt für Strassen ASTRA (2016b) verwendet und gibt einen Hinweis auf den Stand der bereits erfolgten Implementierungen sowie einen Ausblick auf die Zukunft.

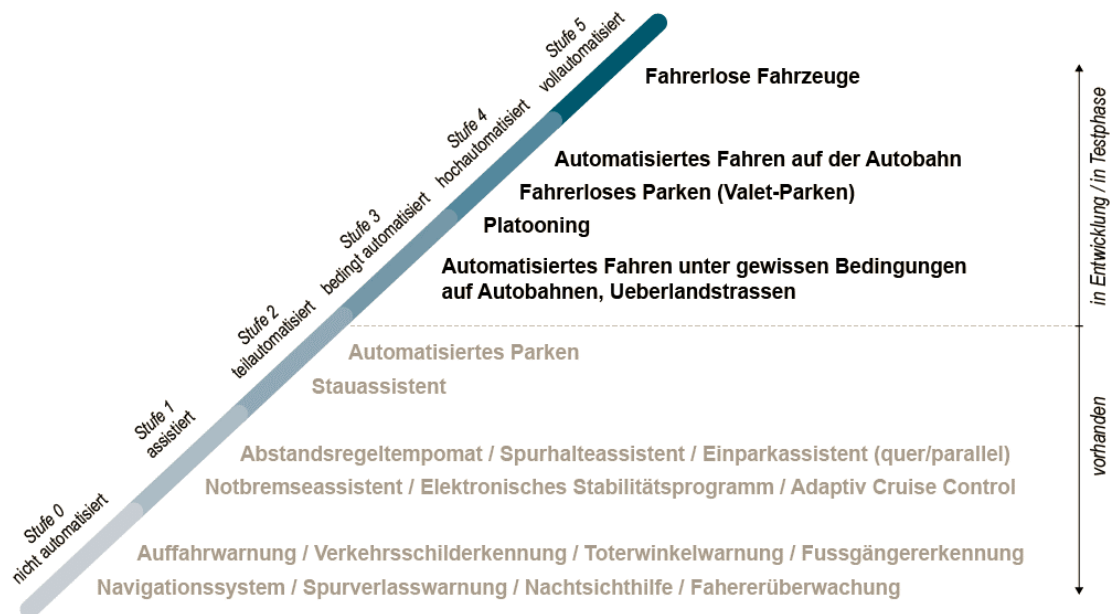


Abbildung 1: Automatisierungsgrad von Fahrzeugen nach SAE J3916 (Stufen 0 - 5) kombiniert mit «Bestehenden und denkbaren zukünftige Entwicklungen im automatisierten Fahren» (Bundesamt für Strassen ASTRA, 2016b, S. 34)

Die vorliegende Untersuchung verwendet Szenarien, um die verschiedenen Entwicklungsphasen zwischen Gegenwart (Stufe 2) und Stufe 5 abzubilden. Die Szenarien sind in den Abschnitten 4.1.5 *Szenario 1*, 4.1.6 *Szenario 2*, 4.1.7 *Szenario 3* und in Abschnitt 4.2 *Szenarien in FaLC* detailliert beschrieben.

2.1.4 Automatisierung und Vernetzung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie autonome Fahrzeuge navigieren können.

Autonome Fahrzeuge können einerseits mittels Sensoren navigieren. Das heisst, dass die Sensoren eines Fahrzeugs (z.B. Kamera) die unmittelbare Umgebung abbilden und damit die benötigten Angaben für die Fahrt ermittelt werden.

Für grosse Strassenkapazitätsgewinne ist jedoch eine zusätzliche Voraussetzung, dass die Fahrzeuge auch untereinander und mit der Infrastruktur vernetzt sind, als sog. *connected and autonomous vehicles* (CAVs). Nur so kann der Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen deutlich verringert und der Verkehrsfluss optimiert werden. Dafür müssen die Fahrzeuge Informationen zu Ziel, Beschleunigungs- und Bremsverhalten der anderen Fahrzeuge haben (engl. *vehicle-to-vehicle* / V2V). Sind die Fahrzeuge auch mit der Infrastruktur vernetzt (engl. *vehicle-to-infrastructure* / V2I), kann die aktuelle Verkehrssituation, das heisst die Nachfrage nach Strassenkapazität und das entsprechende Angebot, in Echtzeit adaptiert werden, beispielsweise mittels Verkehrsknotenmanagement (Bundesamt für Strassen ASTRA, 2016b, S. 10).

2.1.5 Interpretation von und Umgang mit komplexen Umgebungen und Situationen

Fagant (2015) zeigt auf, dass viele Umgebungssituationen für autonome Fahrzeuge bereits heute keine Herausforderung mehr darstellen. Es gibt aber verschiedene Situationen, in denen autonome Fahrzeuge die Umgebung noch nicht befriedigend verarbeiten können. Spiegelnde, nasse, verdreckte oder verschneite Fahrbahnoberflächen erschweren die Interpretation massgeblich. Auch die korrekte Deutung von Lebewesen oder Objekten im Raum stellt für autonome Fahrsysteme gegenwärtig eine Herausforderung dar (Fagant & Kockelmann, 2015, S. 169-170).

2.1.6 Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmenden

Brooks (2017) zeigt in seinem Beitrag die Dimension sozialer Interaktion auf den Verkehrsfluss auf. Brooks (2017) sieht autonome Fahrzeuge in diesem Sinne als *social outcasts*, die [noch, *Anm. d. Verf.*] nicht befriedigend mit der Umwelt, insbesondere mit anderen Personen, interagieren und kommunizieren können. Im konventionellen Strassenverkehr ist die Interaktion und Kommunikation unter den Verkehrsteilnehmenden ein wichtiger Bestandteil der niederschweligen Verkehrsregelung, insbesondere in dichteren Gebieten.

Beispiel: Im Falle eines für lange Zeit nicht abreissenden Fussgängerstroms ohne übergeordnete Verkehrsregelung durch ein Lichtsignal gewähren Fussgänger in der Regel dem konventionellen Fahrzeug nach einer Weile die Durchfahrt - dies entgegen der herrschenden Vortrittsregelung. Brooks stellt die Frage, ob einem autonomen Fahrzeug, das sich möglicherweise sogar auf einer Leerfahrt befindet, je die Durchfahrt gewährt werden würde, oder ob das Fahrzeug unter Umständen mehrere Stunden stehen bleiben müsste.

Die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss in der unmittelbaren Umgebung und auf die Zweckmässigkeit autonomer Fahrzeuge wären hoch und stellen die heute vorherrschende Kommunikation der Verkehrsteilnehmenden in Frage.

Der Sachlage, die sich aus den beschriebenen Beispielen ergibt, wird in der vorliegenden Untersuchung folgendermassen Rechnung getragen: In Szenario 1 wird vollautomatisiertes Fahren nur auf Autobahnen und Hauptstrassen ausserorts möglich ist. In komplexen Situationen innerorts wird das Fahrzeug weiterhin konventionell bedient. Die Witterungsverhältnisse und Interaktionsdichte werden nicht weiter vertieft.

2.1.7 Zeitpunkt der Implementierung

Der Frage, ob, wann und in welcher Form vollautonome Fahrzeuge einst der breiten Masse zur Verfügung stehen werden, hat sich der Bericht *Entwicklung konsistenter Szenarien für die Einführung autonomer Fahrzeuge* (Becker, Bösch, Ciari, & Axhausen, 2016) angenommen. Dabei wird festgehalten, dass das Spektrum möglicher Entwicklungen gross ist und demzufolge mit vielen Unsicherheiten behaftet ist (Becker, Bösch, Ciari, & Axhausen, 2016, S. 13). Ferner gilt es zu beachten, dass die verschiedenen (teil-)autonomen Mobilitätsprodukte zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten marktreif sein werden; dies auch in Abhängigkeit von erwarteten regulatorischen Eingriffen und von kulturell unterschiedlich geprägtem Nutzerverhalten (in Anlehnung an Becker, 2016, S. 13).

Fagant und Kockelmann (Fagant & Kockelmann, 2015, S. 168) schätzen, dass vollautonome Fahrzeuge ab 2022/2025 der breiten Masse zur Verfügung stehen können. Der Schweizer Bundesrat erwartet gemäss Medienmitteilung vom 21.12.2016 (Bundesamt für Strassen ASTRA, 2016a), dass «...automatisierte Fahrzeuge in den nächsten 15 bis 25 Jahren einen beträchtlichen Anteil der zugelassenen Strassenfahrzeuge ausmachen werden.» Im entsprechenden Bericht des Bundesamts für Strassen ASTRA Automatisiertes Fahren - Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen (2016b, S. 3) wird aber auch darauf hingewiesen, dass noch weitgehend offen sei, wie Gesellschaft, Politik und Wirtschaft mit den neuen Möglichkeiten umgehen werden und dass auf internationaler Ebene noch verschiedene zentrale Aspekte zu klären sind.

Abbildung 2, ein Inserat von 1957, zeigt, dass die Vision autonomer Fahrzeuge die Menschheit seit mindestens 60 Jahren beschäftigt. Dabei schreitet die Entwicklung stetig voran.

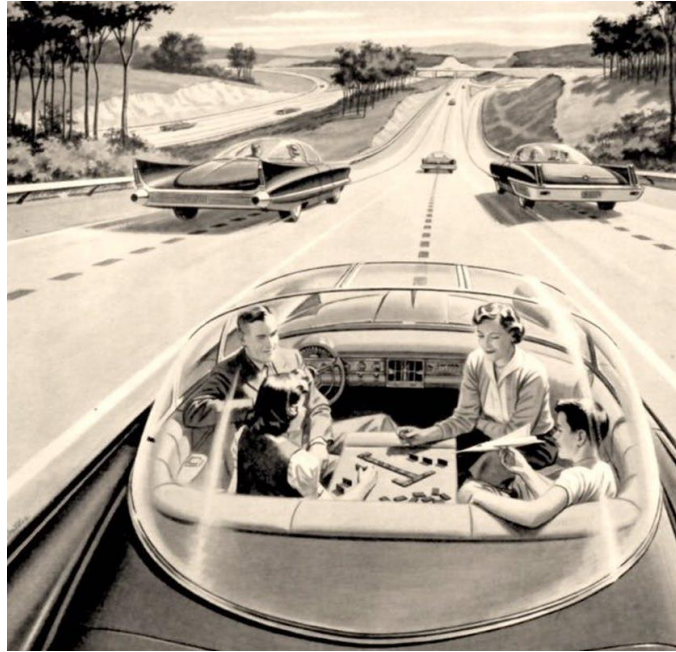


Abbildung 2: Werbung von 1957 für “America’s Independent Electric Light and Power Companies”, Illustration von H. Miller. Begleittext im Original: *ELECTRICITY MAY BE THE DRIVER. One day your car may speed along an electric super-highway, its speed and steering automatically controlled by electronic devices embedded in the road. Highways will be made safe—by electricity! No traffic jams...no collisions...no driver fatigue.*

2.2 Raumwirksame Effekte autonomer Fahrzeuge

Im Folgenden werden die für die vorliegende Simulation relevanten Effekte autonomer Fahrzeuge aufgezeigt.

2.2.1 Autonome Fahrzeuge sind günstiger

Bösch, Becker, Becker, & Axhausen (2017) untersuchten die Kostenstrukturen autonomer Mobilitätsservices und verglichen diese mit dem konventionellen Angebot. Hierbei zeigte sich folgendes Bild:

Vergleicht man die Kostenstruktur eines konventionellen Privatautos mit der eines konventionellen Taxis, zeigt sich, dass die Kosten für das Privatauto hauptsächlich aus Fixkosten und die Kosten für ein Taxi hauptsächlich aus Fahrerkosten bestehen. (Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017, S. 16) Die Kostenstruktur ist in Abbildung 3 dargestellt.

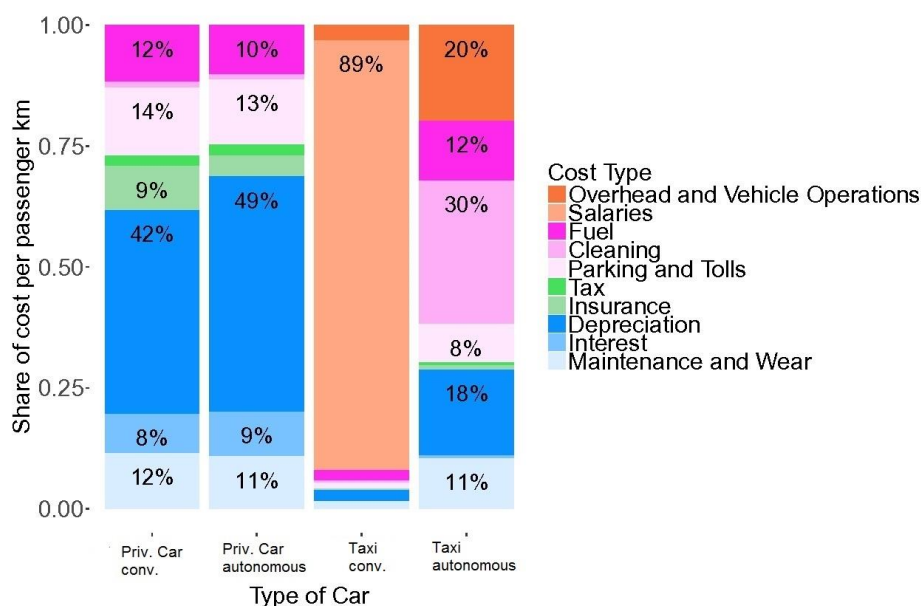


Abbildung 3: Kostenstrukturvergleich konventionelle und autonome Fahrzeuge (Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017, S. 16)

Ferner zeigen Bösch et al. (2017) auf, dass sich die Kostenstruktur autonomer Autos stark von deren konventioneller Autos unterscheidet: Einerseits wird erwartet, dass die Technologie für autonomes Fahren zu einem höheren Einstandspreis führt, andererseits reduzieren tiefere Versicherungsprämien, tiefere Unterhalts- und Treibstoffkosten die Betriebskosten. Zusätzlich operieren die autonomen Taxiflotten ohne Fahrer/-in, somit entfällt der bedeutendste Kostenfaktor.

Preise nach Fahrzeugtyp nach Bösch et al. (2017):

<i>Private Car conventional</i> , pro Person und Kilometer (engl. <i>Privatauto</i> , konventionell)	0.482 CHF ⁸
<i>Private Car autonomous</i> , pro Person und Kilometer (engl. <i>Privatauto</i> , autonom)	0.486 CHF
<i>Individual Taxi conventional</i> , pro Kilometer (engl. Einzelbelegung Taxi, konventionell)	2.62 CHF
<i>Individual Taxi autonomous</i> , pro Kilometer (engl. Einzelbelegung Taxi, autonom)	0.383 CHF

Tabelle 1: Preise nach Fahrzeugtyp (Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017, S. 19, Tabelle 3)

Die Resultate von Tabelle 1 zeigen auf, dass ein autonomes Taxi in Einzelbelegung signifikant günstiger als ein privat gehaltenes Fahrzeug wird. Dies obwohl für autonome Taxis mehr als die Hälfte des Kostenansatzes für Reinigung und Management veranschlagt wurde. (Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017, S. 17) Bemerkenswert ist

⁸ Die Resultate von Bösch (2017) sind Passagier-Kilometerkosten und daher nicht direkt mit den Kilometerkosten zu vergleichen.

ferner, dass es nur einen marginalen Unterschied der Passagier-Kilometerkosten zwischen einem konventionellen und autonomen Privatauto gibt. Die beiden Angebote sind fast gleich teuer. Die Erkenntnisse sind wichtig für die folgende Forschungsfrage.

Kilometerkosten konventionell: In Tabelle 2 sind zum Vergleich einige Kosten von konventionellen Mobilitätsangeboten aufgelistet.

Privates Fahrzeug, konventionell, 2017 (TCS, 2017)	0.70 CHF/km
Taxi, konventionell, 2017 (Stadt Zürich, 2015)	5.00 CHF/km +8.00 CHF Grundtaxe
Stadtbusse, 2011 (Bundesamt für Verkehr BAV, 2017; zit. In Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017, S. 15)	7.14 CHF/km
Bus Agglomerationsverkehr, 2011 (Bundesamt für Verkehr BAV, 2017; zit. In Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017, S. 15)	7.01 CHF/km
Personenzug, 2011 (Bundesamt für Verkehr BAV, 2017; zit. In Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017, S. 15)	31.40 CHF/km

Tabelle 2: Kosten für konventionelles Verkehrsangebot

2.2.2 Autonome Fahrzeuge sind sicherer

2015 standen 23% der Strassenverkehrsunfälle in der Schweiz in Zusammenhang mit übersetzter oder unangepasster Geschwindigkeit, 12% in Zusammenhang mit Alkohol- und 1% mit Drogen- und/oder anderem Medikamentenkonsums (Bundesamt für Statistik BFS, 2016). Autonome Fahrzeuge hingegen können so programmiert werden, dass sie keine Verkehrsregeln brechen. Ausserdem ist ihre Reaktionszeit schneller, sie werden nicht abgelenkt und sind nicht aggressiv oder unerfahren (Fagant & Kockelmann, 2015, S. 169). Es wird erwartet, dass die Versicherungsprämien entsprechend zurückgehen werden (Fagant & Kockelmann, 2015, S. 169).

2.2.3 Autonome Fahrzeuge sind komfortabler

Nach Litmann (2017) verringert sich der Stress für Reisende und Pendler in autonomen Fahrzeugen, sie können sich während der Fahrt ausruhen oder arbeiten. Der Komfort entspricht also in etwa dem einer heutigen Taxifahrt (Litmann, 2017, S. 10). Der Stress reduziert sich jedoch nicht nur dadurch, dass das Bedienen des Fahrzeugs entfällt, auch die Parkplatzsuche wird hinfällig und die Prognosen zur Reisedauer und Ankunftszeit werden bei vernetzten und autonomen Fahrzeugen genauer (Bundesamt für Strassen ASTRA,

2016b, S. 12). Die gewonnene Planungssicherheit führt dazu, dass die Reise gerade rechtzeitig und mit weniger Pufferzeit begonnen werden kann. Das spart Zeit und erhöhte Planungssicherheit senkt das Stresslevel zusätzlich. Bei einer Anpassung der Fahrzeugdimensionen und des Fahrzeuginterieurs an die neue Nutzungsart darf ein zusätzlicher Gewinn erwartet werden (in Anlehnung an Litmann, 2014, S. 10).

Mit autonomen Fahrzeugen werden Reise- und Pendelverhalten möglich, die heute unwahrscheinlich sind. So wird es beispielsweise denkbar, die Nächte, oder ein Teil davon, schlafend im Fahrzeug zu verbringen (Annahme). Damit könnte die Distanz zwischen Arbeitsort und Wohnort vergrößert werden. Manche Ferienhäuser könnten Hauptdomizil werden. Denkbar ist auch, die kurze Nacht nach einem langen Tag bei der Arbeit gleich vollständig im Fahrzeug zu verbringen, statt nach Hause zu fahren. Motels müssten keine Zimmer, sondern nur noch Infrastrukturen für die Körperhygiene anbieten.

Das Ausmass des Komfortgewinns kann heute noch nicht quantifiziert werden. Als Folge wird jedoch eine höhere Nachfrage⁹ erwartet. (Litmann, 2017, S. 8)

2.2.4 Autonome Fahrzeuge stehen allen Personen offen

Vollautonome Fahrzeuge bedürfen zur Benutzung keines Führerausweises, sie stehen allen Personen offen. Auch aus diesem Grund wird eine höhere Nachfrage erwartet. Annahmen zur Erhöhung werden im Abschnitt 4.1.6 *Szenario 2* und 4.1.7 *Szenario 3* beschrieben.

2.2.5 Autonome Fahrzeuge führen zu mehr Verkehr

Es wird erwartet, dass autonome Fahrzeuge aus verschiedenen, teilweise bereits beschriebenen Gründen zu einer erhöhten Nachfrage nach Mobilitätsdienstleistungen führen. Die gestiegene Anzahl Fahrten bedeutet in der Folge eine höhere Beanspruchung der Strassenkapazität¹⁰, welche zu Überlastungserscheinungen führen kann.

Hörl (2016, S. 10) stellt die Ursachen dafür wie folgt zusammen:

- Neue Nutzergruppen, siehe Abschnitt 2.2.4 *Autonome Fahrzeuge stehen allen Personen offen*,
- Keine Abhängigkeit mehr vom Fahrplan, auch Nachtfahrten werden möglich,

⁹ Siehe Abschnitt 2.2.5 *Autonome Fahrzeuge führen zu mehr Verkehr*

¹⁰ Siehe Abschnitt 2.3.2 *Strassenkapazität*

- Höhere Fahrzeugstückzahl, wenn Busse und Trams mit kleineren Einheiten ersetzt werden. [Der Verkehrsfluss kann durch einheitlichere Fahrzeuggrößen und Geschwindigkeiten aber auch flexibler gesteuert werden, *Anm. d. Verf.*],
- Gestiegener Komfort führt zu mehr (und längeren (Litmann, 2017, S. 8)) Fahrten,
- Autonome Fahrzeuge ermöglichen Leerfahrten.

Ferner zeigt Brooks (2017) die Bedeutung selbstfahrender und somit selbstparkierender resp. Warteschleifen-fahrender Fahrzeuge für bestehende Verkehrsleit- und auf. Nach Brooks (201) wird es möglich, für einen Espresso oder einen Arztbesuch kurz auszusteigen und das Fahrzeug in der Zwischenzeit um den Block fahren lassen. Brooks (2017) erwartet ausserdem einen Schwarm leerer autonomer Fahrzeuge in den Strassen rund um Grossanlässe und Flughäfen.

2.3 Allgemeine verkehrliche Grundlagen

Im Folgenden werden die für diese Untersuchung relevanten, verkehrstheoretischen Grundlagen erläutert.

2.3.1 Was ist Erreichbarkeit / Potentialansatz

Hansen (1959) hat als Erster Erreichbarkeit als Potential definiert (Tschopp, 2007, S. 44). Heute ist der Potentialansatz eine gängige Methode, um die Erreichbarkeit eines Ortes zu berechnen (Tschopp, 2007, S. 43) und wird auch vom hier verwendeten integrierten Verkehrs- und Raumnutzungs-Simulationstool (FaLC) (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 17) sowie dem Nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) verwendet (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b, S. 5). Eine einheitliche Definition von Erreichbarkeit ist bis dato jedoch nicht gegeben (Axhausen K. W., Fröhlich, Tschopp, & Keller, 2003, S. 1).

Geurs (2006, S. 201) definiert Erreichbarkeit wie folgt:

«[...] accessibility is defined as the extent to which the land-use and transport systems enable (groups of) individuals to reach activities or destinations by means of a (combination of) transport mode(s).»

Deutsch: Erreichbarkeit ist definiert über das Ausmass, zu welchem Raumnutzungs- und Transportsysteme es (Gruppen von) Personen ermöglichen, Aktivitäten oder Ziele mit Hilfe (einer Kombination) von Transportmitteln zu erreichen.

Die Erreichbarkeit, nun Potential, eines Ortes setzt sich demnach aus den drei Komponenten, Aktivitätspunkte, Raumüberwindung und Gewichtung der Distanz zusammen (Tschopp, 2007, S. 43-44). Sie wird wie folgt beschrieben:

$$E_i = \sum_{j=1}^{J=\max} A_j * \exp(-\beta * c_{ij})$$

- E_i Erreichbarkeitsmass in Punkt i (Potential)
 A_j Anzahl Aktivitätspunkte in Punkt j (z-B. Bevölkerung, Jobs)
 C_{ij} Kosten der Raumüberwindung zwischen Punkt i und Punkt j
 β Distanz-Gewichtungsfaktor

Die Verwendung des Potentialansatzes eignet sich sehr gut, um verschiedene Standorte miteinander zu vergleichen. Jedoch müssen Annahmen zur den Kosten der Raumüberwindung C_{ij} , zu den Aktivitätspunkten A_j und zum Distanzgewichtungsfaktor¹¹ getroffen werden. Je genauer die Annahmen sind, desto genauer ist das Mass (Tschopp, 2007, S. 47). Es eignet sich gemäss Fotheringham (2000, S. 162-187, 244) für ziemlich akkurate Schätzungen räumlicher Ströme. Siehe auch *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand* (Ben Akiva & Lerman, 1997).

Unter *Erreichbarkeitswirkungen* wird in vorliegender Arbeit die Wirkung eines oder mehrerer Parameter verstanden, die den Erreichbarkeitswert verändern.

Die raumwirksame Bedeutung von Erreichbarkeit wird unter Abschnitt 2.4 *Zusammenhang von Erreichbarkeit und Raumentwicklung* vertieft.

2.3.2 Strassenkapazität

Verkehrswege haben eine bestimmte Kapazität, diese ist abhängig von Netzhierarchie, Anzahl Fahrstreifen, Topografie, Anteil Schwerverkehr sowie Witterung und Betriebsbedingungen wie Geschwindigkeitsvorgaben (in Anlehnung an Rudolf Keller & Partner Verkehringenieure für Bundesamt für Strassen ASTRA, 2002, S. 15). Möchten mehr Verkehrsteilnehmer einen bestimmten Abschnitt nutzen, als Kapazität zur Verfügung steht, kommt es zu einer Überlastung. Dadurch wird die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit reduziert, in der Folge entstehen höhere Zeit- und Fahrzeugbetriebskosten¹² (Stock & Bernecker, 2014, S. 117).

Kapazitätssteigerungen haben aber nur einen Effekt, wenn die Auslastung bereits so hoch ist, dass die Verkehrsqualität bereits beeinträchtigt wird. Die Schweizerische Norm SN 640 023 der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) (2000, S. 132) zeigt die graduelle Abstufung der Verkehrsqualität in Abhängigkeit der Auslastungsgrade auf.

¹¹ Siehe auch Abschnitt 2.4.2 *Erreichbarkeit als Potential*, Exponent x

¹² Siehe Abschnitt 2.3.5 *Generalisierte Kosten des Verkehrs*

Dieser Sachverhalt ist für die vorliegende Untersuchung relevant, weil die Kapazitätsgewinne autonomer Fahrzeuge nur auf jenen Netzabschnitten einen Vorteil bringen, auf denen die Auslastung ausreichend hoch ist. Auf Strassen, deren Auslastung sehr gering ist (z.B. eine wenig befahrene Landstrasse), können die Kapazitätserhöhungen autonomer Fahrzeuge keinen Beitrag zur Verbesserung leisten.

2.3.3 Auslastung des Verkehrsnetzes

Der Auslastungsgrad des Schweizer Verkehrsnetzes bezüglich des motorisierten Verkehrs ist stark abhängig von der Tageszeit und vom Wochentag. Über den Tag verteilt gibt es Spitzen am Morgen zwischen 7 und 8 Uhr und abends zwischen 17 und 18 Uhr. Wochentags ist das Verkehrsaufkommen grösser als am Wochenende (Stadt Zürich, 2013, S. 17).

Überlastungserscheinungen treten in Abhängigkeit zu diesen Spitzenstunden auf. Abbildung 4 zeigt auf, welche Orte an einem Dienstagmorgen, bei Abfahrt um 07:15 Uhr (Morgenspitzenstunde), von Stau betroffen sind (Credit Suisse, 2014, S. 12).

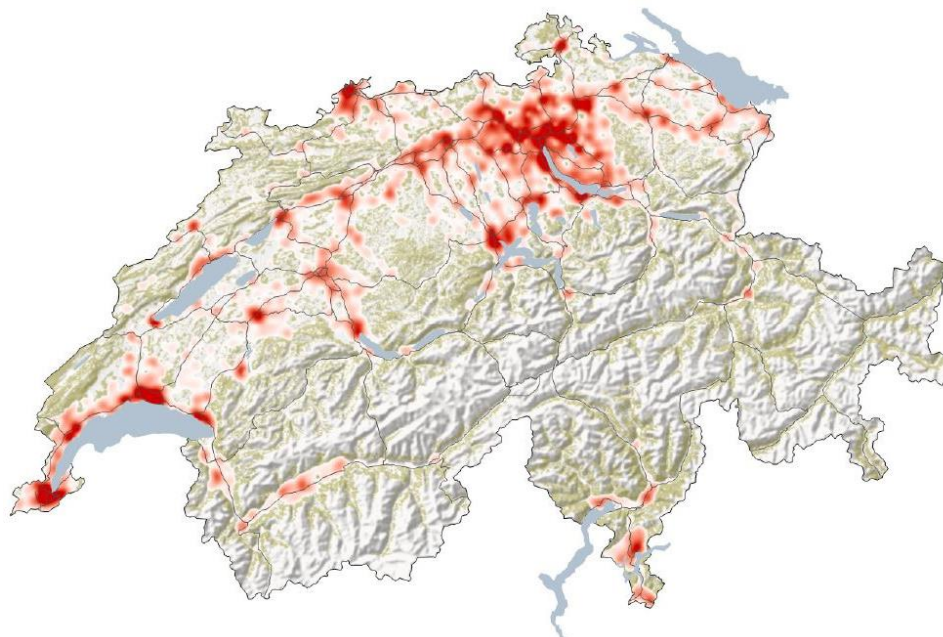


Abbildung 4: Orte (rot), an denen Pendler an einem Dienstagmorgen bei Abfahrt um 07:15 Uhr vom Stau betroffen sind, pro km² (Credit Suisse, 2014, Titelseite)

2.3.4 Rentabilität des öffentlichen Verkehrs

Schweizweit stehen zur Rentabilität des öffentlichen Verkehrs nur stark aggregierte Daten zur Verfügung. Das heisst, es ist gegenwärtig in der Regel nicht möglich, eine Aussage zur Rentabilität einzelner Linien zu machen (Bundesamt für Statistik BFS, 2016).

Zudem können Fahrten über Zonen- oder Verbundsysteme nicht direkt ausgewertet werden.

Bei den aggregierten Daten für die ganze Schweiz zeigt sich, dass der Kostendeckungsgrad beim öffentlichen Strassenverkehr nach Anrechnung von Tarifeinnahmen, Subventionen und Abgeltungen 2013 bei 43% durch die Verkehrsnutzenden lag. 52% bezahlte die öffentliche Hand und 5% die Allgemeinheit (Bundesamt für Statistik BFS, 2016, S. 6). Der Kostendeckungsgrad nach Berücksichtigung aller Transfers betrug 46% durch die direkten Einnahmen der Nutzenden des Personenverkehrs auf der Schiene. Die öffentliche Hand bezahlte 48% und die Allgemeinheit 5% (Bundesamt für Statistik BFS, 2016, S. 6).

Für den Kanton Zürich lässt sich an Hand der Antwort des Zürcher Regierungsrates auf eine dringliche Anfrage zum Kostendeckungsgrad der Linien im Zürcher Verkehrsverbund (2016, S. 2-9) ein genaueres Bild zeichnen. Im Bericht zeigt die Erfolgsrechnung aller Linien der Zürcher Verkehrsverbunds (ZVV) auf: Eine einzige Linie, die S12 zwischen Zürich und Winterthur, ist mit einem Kostendeckungsgrad von 117.5% rentabel. Alle anderen Linien sind nicht rentabel. Die fünf unrentabelsten Linien des Zürcher Verkehrsverbundes weisen einen Kostendeckungsgrad von 8.5% bis 31% auf.

Im Allgemeinen hängt die Rentabilität einer Linie einerseits von der Höhe der Betriebskosten und andererseits von den Einnahmen durch die Passagiere ab. Lässt man Zonenmodelle und Pauschalpreis-Abonnemente ausser Acht, führt eine hohe Passagierbelegung einer Linie zu höheren Einnahmen und umgekehrt. Die Frage, ab welcher Belegung und bei welchen Vergleichsbetriebskosten eine autonome Taxiflotte rentabler ist, kann in vorliegender Arbeit nicht beantwortet werden.

Hinweise dazu, in welchen Gebieten autonome Taxis ein besonders grosses Potential als Ergänzung zum konventionellen öffentlichen Verkehr haben könnten, finden sich bei der räumlichen Analyse der unrentabelsten Linien: Sie erschliessen allesamt ländliche oder intermediäre Gemeinden¹³.

¹³ Klassifizierung gemäss *Gemeindetypologie und Stadt/Land-Typologie 2012* (Bundesamt für Statistik BFS, 2017)

2.3.5 Generalisierte Kosten des Verkehrs

Stock & Bernecker (2014, S. 247) definieren die generalisierten Kosten des Verkehrs als «die gesamten Kosten einer Reise (Fahrt), die sich aus monetären und Zeitkosten zusammensetzen».

Axhausen (2014, S. 7) erweitert das Konzept und beschreibt die generalisierten Kosten als «Summe der risiko- und komfortgewichteten entscheidungsrelevanten Ressourcenverbräuche der Fahrt des Einzelnen» an Hand der «aufgewendeten Zeit (in ihren Elementen) und den «(für den jeweiligen Zeithorizont entscheidungsrelevanten) monetären Kosten».

Die Definition von Axhausen (2014) lässt es zu, nebst den Zeit- und Kosteneinsparungen, auch Komfortgewinne abzubilden. Es wird erwartet, dass Komfortgewinne einen relevanten Anteil zu den generalisierten Kosten autonomer Fahrzeuge bilden. In der Simulation in FaLC sind die generalisierten Kosten vereinfacht und nur über die Reisezeit abgebildet.

2.3.6 Induzierte Nachfrage

Nach Fröhlich (2008, S. 10) definieren verschiedene Autoren die Begriffe induzierter Verkehr und induzierte Nachfrage unterschiedlich. Im Folgenden wird induzierte Nachfrage beispielhaft an Hand des Berichts von Cervero und Hansen (2002, S. 470) aufgezeigt. Das Konzept besagt, dass eine Erhöhung der Strassenkapazität¹⁴, beispielsweise durch den Bau weiterer Spuren, grösstenteils durch die induzierte Nachfrage wieder kompensiert wird. Damit benutzen nach einer Kapazitätserhöhung absolut mehr Fahrzeuge den Abschnitt als vor der Erhöhung. Die Erhöhung führt folglich nur kurzfristig zu einer relativen Entlastung. Siehe auch *Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs* (Weis & Axhausen, 2012).

Die induzierte Nachfrage auf Grund der erhöhten Kapazität und der Erreichbarkeitsgewinne wird in dieser Arbeit nicht abgebildet, ist aber ein relevanter Bestandteil der räumlichen Auswirkungen autonomer Fahrzeuge.

2.3.7 Erreichbarkeitstopographie der Schweiz für MIV und ÖV

Wie unter Abschnitt 2.3.1 *Was ist Erreichbarkeit / Potentialansatz* aufgezeigt wurde, steht eine hohe Erreichbarkeit für eine hohe Standortgunst eines Ortes. Für die Schweiz gibt es detaillierte Karten, die die Erreichbarkeiten graphisch darstellen. Abbildung 5

¹⁴ Siehe Abschnitt 2.3.2 *Strassenkapazität*

zeigt die Erreichbarkeitswerte mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) 2005 und Abbildung 6 zeigt die Erreichbarkeitswerte mit dem öffentlichen Verkehr (ÖV) 2005. Je höher die Erhebung, desto besser ist die Erreichbarkeit.

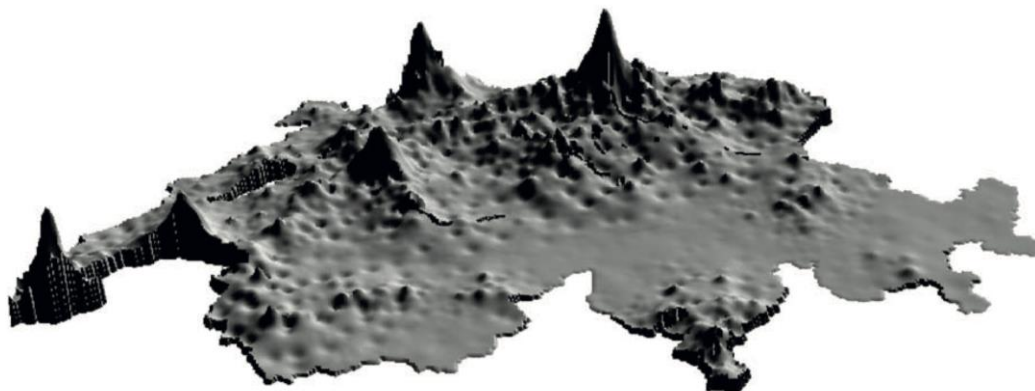


Abbildung 5: Erreichbarkeit (als Potential) mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) 2005 (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2010a, S. 23)

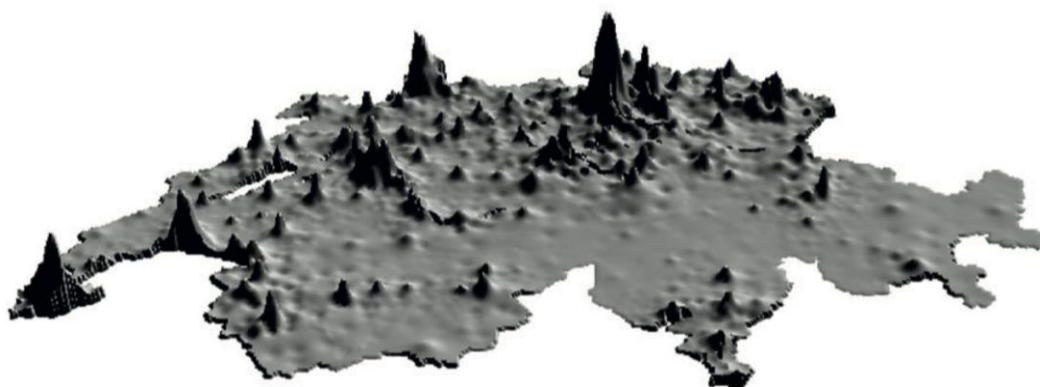


Abbildung 6: Erreichbarkeit (als Potential) mit dem öffentlichen Verkehr (ÖV) 2005 (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2010a, S. 22)

In beiden Abbildungen erreichen die Städte Genf, Lausanne, Bern Basel und Zürich (v.l.n.r.) Spitzenwerte bei der Erreichbarkeit und grosse Teile der Alpen und des Juras sind durch sehr tiefe Erreichbarkeitswerte bezeichnet.

Die Summe der Erhebungen der Erreichbarkeitswerte des motorisierten Individualverkehrs (MIV) ist deutlich grösser als die Summe der Erreichbarkeitswerte des öffentlichen Verkehrs (ÖV). Das heisst, das gesamte Erreichbarkeitspotential mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) ist signifikant grösser als das des öffentlichen Verkehrs (ÖV).

Im Vergleich mit der Karte des öffentlichen Verkehrs (ÖV), sind die Erhebungen des motorisierten Individualverkehrs (MIV) weniger punktuell und weniger steil, das heisst die Erreichbarkeit eines Punktes nimmt relativ zur Distanz weniger schnell ab. Weiter ist

bei der Abbildung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) die Fläche des Mittelands, die sich zwischen den grossen Erhebungen der Städte aufspannt, gesamthaft erhöht im Vergleich zu den nur punktuellen Erhebungen der Vergleichskarte zum öffentlichen Verkehr (ÖV).

Dieser Sachverhalt kommt in Szenario 3 zu tragen, wenn eine autonome Flotte das bestehende Konzept des öffentlichen Verkehrs verändert und wird über die Komponente VAR abgebildet.

2.4 Zusammenhang von Erreichbarkeit und Raumentwicklung

Im Folgenden wird der Zusammenhang von Erreichbarkeit und Raumentwicklung aufgezeigt. Damit können die erwarteten Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge hinsichtlich ihres raumwirksamen Potentials untersucht werden. Im Abschnitt 2.3.1 *Was ist Erreichbarkeit / Potentialansatz* wurden die theoretischen Grundlagen von Erreichbarkeit bereits erläutert.

Im Jahr 1959 hat Walter G. Hansen unter dem Titel *How Accessibility Shapes Land Use* im Journal of the American Institute of Planners (JAPA) ein Modell zur Vorhersage von Siedlungsentwicklung vorgestellt, welches seine Gültigkeit bis heute nicht verloren hat. Der Zusammenhang zwischen Erreichbarkeit und Raumentwicklung wird in den folgenden Abschnitten an Hand dieses Modells erläutert.

2.4.1 Ziel und Grundlagen des Modells

Ziel des Modells ist es, die Zusammenhänge von Erreichbarkeit und Entwicklungspotential von Wohngebieten aufzuzeigen. Das Entwicklungspotential wird in Bezug auf die Erreichbarkeit von kommerziellen, industriellen und anderen, auf das Wohnen bezogenen Angeboten untersucht. Die Erreichbarkeitsbeziehungen zusammen mit der Verfügbarkeit von Bauland bilden die Grundlage des Modells (Hansen, 1959, S. 73).

2.4.2 Erreichbarkeit als Potential

Bei Hansen (1959) wird Erreichbarkeit erstmals als Potential von Möglichkeiten für Interaktion gemessen. Erreichbarkeit ist somit ein Mass der räumlichen Verteilung von Aktivitäten um einen Punkt, hinsichtlich der Möglichkeit und des Wunsches der Individuen und Firmen, räumliche Distanz zu überwinden. Konkret zeigt die Erreichbarkeit von Punkt 1 auf, welche Möglichkeiten (z.B. Jobs) in Punkt 2 zu erreichen sind. Je grösser die Möglichkeiten in Punkt 2 sind (z.B. Anzahl der Jobs), desto höher der Erreichbarkeitswert in Punkt 1.

Der Wert in Punkt 1 ist umgekehrt proportional zur Distanz zwischen Punkt 1 und 2. Das heisst, je entfernter Punkt 2 liegt, desto geringer ist der relative Wert der Möglichkeiten in Punkt B. Die Erreichbarkeit eines Punktes wird bei Hansen (1959) wie folgt ermittelt:

$${}_1A_2 = \frac{S_2}{T_{1-2}^x}$$

- 1A2 ist die relative Erreichbarkeit in Punkt 1 zu Punkt 2 (engl. accessibility)
- S2 ist die Grösse der Möglichkeiten in Punkt B (z.B. Anzahl Jobs) (engl. size)
- T1-2 entspricht der Reisezeit oder Distanz zwischen Punkt 1 und 2 inkl. Rüstzeit (engl. terminal time)
- X ist ein Exponent der Reisezeit / Distanz in Abhängigkeit der Art des Trips

Stehen mehrere Punkte oder Zonen zur Verfügung, wird die Erreichbarkeit in Punkt 1 wie folgt ermittelt:

$${}_1A_n = \frac{S_2}{T_{1-2}^x} + \frac{S_3}{T_{1-3}^x} \dots + \frac{S_n}{T_{1-n}^x}$$

Der Exponent der Reisezeit ist abhängig vom Nutzen einer Fahrt. Es zeigte sich, dass die Toleranz für die Länge der Strecke zwischen A und B umso grösser ist, je wichtiger der Trip ist. Empirische Tests zeigten folgende Werte:

- ≥2.0 Schulweg
- 2.0 Einkaufsfahrt
- 1.1 Fahrt für soziale Aktivitäten (Freunde, Familie)
- 0.9 Arbeitsweg

Die Werte zeigen, dass 1959 die grösste Toleranz für die Distanz des Arbeitswegs vorhanden war. Für keinen anderen Zweck war man bereit, eine längere Strecke zurückzulegen.

2.4.3 Empirische Bestätigung

Anhand von Daten für die Metropolitanregion von Washington, D.C, untersuchte Hansen (1959) empirisch das Verhältnis der Entwicklung von Wohngebieten und Erreichbarkeit mittels der vorgängig beschriebenen Formel und Exponenten (Hansen, 1959, S. 74).

Dafür wurde der Untersuchungsperimeter in Zonen unterteilt und das zur Verfügung stehende Bauland pro Zone als Prozentsatz festgelegt. Dieser Prozentsatz stand für die *mögliche Entwicklung* und wurde anschliessend im Verhältnis zur tatsächlichen Entwicklung hinsichtlich der Erreichbarkeit pro Zone analysiert und zeigt eine verhältnismässig hohe

Korrelation. In der Folge konnte die untenstehende Formel abgeleitet werden (Hansen, 1959, S. 75).

$$D_I = KA_I^x$$

- D1 Entwicklungsverhältnis für Zone 1, tatsächliche Entwicklung dividiert durch mögliche Entwicklung (engl. development ratio)
- A1 Erreichbarkeit in Zone 1 (engl. accessibility)
- K Proportionalitätskonstante

Anhand der obenstehenden Formel wurde es möglich, das Entwicklungspotential eines Wohngebiets zu schätzen, sofern die Erreichbarkeit und das verfügbare Entwicklungsland bekannt waren. Um die tatsächliche Entwicklung zu schätzen wird die mögliche Entwicklung mit dem Entwicklungsverhältnis multipliziert.

Ein Vergleich der geschätzten Entwicklung zur tatsächlichen Entwicklung der Jahre 1948 bis 1955 zeigte folgende Resultate: 40% des geschätzten Wachstums lagen innerhalb von 30% des tatsächlichen Wachstums und 70% der Schätzungen für die Zonen lagen innerhalb von 60% der tatsächlichen Entwicklung. Berücksichtigt man, dass diese Schätzungen auf nur zwei unabhängigen Variablen beruhen, Erreichbarkeit und verfügbares Bauland, sind die Resultate vielversprechend (Hansen, 1959, S. 75).

2.5 Sprawl

2.5.1 Relevanz, Definition

Art. 75 der Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft (BV) vom 18.4.1999, Stand 12.2.2017, SR101, verlangt die *«zweckmässige und haushälterische Nutzung des Bodens und der geordneten Besiedelung des Landes»*.

„Sprawl“ ist eine Erscheinung, die mehrheitlich als *nicht haushälterische Nutzung des Bodens* verstanden wird. Der Begriff kommt aus dem Amerikanischen und steht für das Ausbreiten der Siedlungsfläche in verhältnismässig lockerer Bebauungsart. Sprawl entsteht in der Regel um ein, meist älteres, Gebiet mit Zentrumsfunktion.

2.5.2 Ursache, Entstehung

Nach Glaeser & Kahn (2004, S. 2483) liegt die Ursache von Sprawl in der Massenmotorisierung. Sprawl sei das «natürliche und unaufhaltsame Resultat von der technologischen Dominanz des Autos» (S. 2483) und nicht, wie oft behauptet, das Resultat von Subventionen für den Autobahnausbau oder schlechter Raumplanung (S. 2482). Diese können

den Effekt verstärken, aber ursächlich sind sie nicht (S. 2483). In der Schweiz beginnt die Massenmotorisierung in der Nachkriegszeit ab den 1950er-Jahren.

2.5.3 Sprawl in der Schweiz

Eine quantitative Analyse der Landschaftszersiedelung der Schweiz (Jaeger, Schwick, Bertiller, & Kienast, 2008) zeigt, dass die grössten Zunahmen in der urbanen Durchdringung¹⁵ zwischen 1960 und 1980 stattfanden (S. 90).

2.5.4 Trend zurück ins Zentrum

Hughes und Seneca (2014, S. 2-3) können am Beispiel der Metropolitanregion New York gegenwärtig eine Trendumkehr der intraurbanen Migration zurück in Richtung Zentrum aufzeigen. Viele Personen und Haushalte entschliessen sich gegenwärtig wieder für ein zentrumsnahes Leben und gegen ein Leben in einer suburbanen Gemeinde. Die Wachstumsraten in den peripheren Lagen gehen zurück. Es gibt folglich auch Tendenzen, die das Ausbreiten von Sprawl abschwächen.

2.5.5 Mehr Sprawl wegen autonomer Fahrzeuge

In den vorhergehenden Abschnitten wurde aufgezeigt, dass autonome Fahrzeuge das Reisen angenehmer und effizienter machen können und daher eine Zunahme der Fahrten (Meyer, Bösch, Becker, & Axhausen, 2016, S. 10) und eine Ausdehnung der Strecken (Litmann, 2017, S. 8) erwartet werden. Zusätzlich zu den neuen Nutzergruppen wird eine Verstärkung der Massenmobilisierung erwartet, der Ursache von Sprawl. Diesen Schluss ziehen auch Meyer (2016, S. 10), Hörl (2016, S. 14), Rodoulis (2014, S. 17), KPMG Australia (2016), das Technologiema­gazin Wired (2014), Laberteaux in einem Interview mit Bloomberg Businessweek (Brustein, 2014) und Fagant und Kockelmann (2015, S. 171). Das komplette Ausmass kann jedoch noch nicht erfasst werden.

¹⁵ «Das Mass «urbane Durchdringung» (Urban Permeation *UP*) gibt an, wie stark die Landschaft der Schweiz durch Siedlungsflächen durchsetzt ist, d.h. nicht nur, wieviel Siedlungsfläche vorhanden ist, sondern auch, wie stark gestreut sie ist.» (Jaeger, Schwick, Bertiller, & Kienast, 2008, S. 70)

3. Forschungsfrage und Methode

3.1 Zwischenfazit: Potential autonomer Fahrzeuge in peripheren Lagen

Die vorhergehenden Kapitel gaben Auskunft über den Stand der Forschung und zeigten, dass die Auswirkungen autonomer Fahrzeuge vielseitig und oft noch wenig quantifiziert sind. Im Folgenden wird nur ein Bereich weiterverfolgt:

Die Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge werden hinsichtlich ihres räumlichen Potentials übersetzt.

Der Stand der Forschung weist darauf hin, dass autonome Fahrzeuge, insbesondere autonome Taxis, die Kostenstruktur des öffentlichen Verkehrs deutlich positiv verändern können. Es liegt auf der Hand, dass überall dort, wo der Preis für ein individuell genutztes, autonomes Taxi im Durchschnitt unter dem Preis für die Bereitstellung des konventionellen öffentlichen Verkehrs liegt, autonome Taxis ein vorteilhaftes Angebot darstellen können.

Hinweise dazu, in welchen Gebieten autonome Taxis besonders grosses Potential als Ergänzung zum konventionellen öffentlichen Verkehr haben, finden sich in der Antwort des Zürcher Regierungsrates auf die dringliche Anfrage zum Kostendeckungsgrads der Linien im Zürcher Verkehrsbund (Regierungsrat des Kantons Zürich, 2016, S. 2-9). Die unrentabelsten Linien erschliessen allesamt nicht-städtische Gebiete.

3.2 Forschungsfrage

Basierend auf dem Zwischenfazit lautet die Forschungsfrage: *Haben autonome Fahrzeuge das Potential die Attraktivität peripherer Lagen als Wohnstandort zu erhöhen?*

3.3 Wahl der Variable

Gegenwärtig ist es noch nicht möglich alle denkbaren Auswirkungen autonomer Fahrzeuge zu erfassen, zu quantifizieren und in einen konsistenten zeitlichen Rahmen zu setzen (Becker, Bösch, Ciari, & Axhausen, 2016, S. 13; Bundesamt für Strassen ASTRA, 2016b, S. 2-3). Daher beschränkt sich die Methode der vorliegenden Untersuchung auf die Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge und, wenn nötig, auf Folgemaassnahmen.

Schätzungen der Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge sind für die ganze Schweiz verfügbar und werden in Abschnitt 4.1 *Inputdaten Erreichbarkeit: Herkunft und Beschreibung* detailliert erläutert. Wie in Abschnitt 2.4 *Zusammenhang von Erreichbarkeit*

und Raumentwicklung aufgezeigt wurde, darf von einem starken Zusammenhang zwischen Erreichbarkeitswerten und Raumentwicklung ausgegangen werden.

Alle anderen Auswirkungen, wie beispielsweise eine Änderung der Mobilitätsnachfrage durch neue Nutzergruppen oder wegen gestiegenen Komforts, werden in der vorliegenden Arbeit nicht abgebildet.¹⁶ Siehe auch *Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs* (Weis & Axhausen, 2012).

3.4 Messen der Auswirkungen

Die Auswirkungen werden schliesslich an Hand der Veränderung der Bevölkerungsverteilung zwischen Zentrum und Peripherie im Vergleich mit einem Basisszenario untersucht. Der Vergleichsindikator *Bevölkerungsstand* eignet sich, um die relative Attraktivität einer Gemeinde abzubilden. Der Unschärfe der Resultate wird damit Rechnung getragen, dass die Resultate nicht gemeindescharf, sondern aggregiert in Raumkategorien (städtisch, intermediär und ländlich) untersucht werden.

3.5 Arbeit in Szenarien

Auch hinsichtlich der Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge ist die Datenlage zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht ausreichend für exakte Prognosen. Dies ist ein weiterer Grund für die Arbeit in Szenarien. Sowohl bei der Ermittlung der Erreichbarkeitswerte (Inputdaten), als auch bei der vorliegenden Untersuchung wurde nach diesem Schema vorgegangen. Ausserdem ist es mittels Szenarien möglich, Entwicklungszwischenstände abzubilden und den breit gestreuten Schätzungen der Strassenkapazitätsszunahmen durch autonome Fahrzeuge Rechnung zu tragen. Es ist daher wichtig, die Resultate als Tendenz zu interpretieren.

Die Annahmen werden an Hand eines integrierten Verkehrs- und Raumnutzungs-Simulationstools simuliert, welches in den folgenden Abschnitten 3.7 *Beschreibung des Simulations-Werkzeugs* und 3.8 *Grundprinzipien und Ausgangslage in FaLC* beschrieben wird.

3.6 Kausalität

Die Modifizierung einer isolierten Variable (Erreichbarkeitswerte) stellt die Kausalität sicher.

¹⁶ Siehe Abschnitt 2.2 *Raumwirksame Effekte autonomer Fahrzeuge*

Je nach Szenario sind jedoch zusätzlich weitere Massnahme notwendig, um die Ausgangslage schlüssig abzubilden. Die einzelnen Beiträge zu den Resultaten der einzelnen Eingriffe zeigen sich im Vergleich mit den anderen Szenarien.

3.7 Beschrieb des Simulations-Werkzeugs FaLC

3.7.1 Was ist FaLC?

FaLC steht für *Facility Location Choice Simulation Tool* und ist ein integriertes Verkehrs- und Raumnutzungs-Simulationstool. Es wird in einem Open-Source-Projekt mit verschiedenen Partnern entwickelt, u.a. mit dem Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH. Für die vorliegende Simulation zu Studienzwecken war die Nutzung aller Komponenten des Tools kostenfrei möglich. Weiterführende Informationen zu FaLC sind unter <http://www.falc-sim.org> zu finden.

3.7.2 Ziel und Zweck von FaLC

Als Flächennutzungs-Simulations-Werkzeug können mit FaLC raumwirksame Szenarien untersucht werden. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen Bautätigkeit, Migrationen, Pendlerbeziehungen, Verkehrsentwicklung und weiteren, exogenen Faktoren berücksichtigt. FaLC verwendet den Ansatz der Mikrosimulation mit dem Ziel, die Gesellschaft an Hand von Agenten¹⁷ so realistisch wie möglich nachzubilden (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b, S. 1).

3.7.3 Vergleichbare Landnutzungsmodelle und Validierung FaLC

FaLC hat viele Gemeinsamkeiten zu anderen Mikrosimulations-Modellen, wie z.B. UrbanSim. Wesentliche Unterschiede sind aber das integrierte demographische Modell sowie die Ausrichtung zur Integrierung von Verkehrsmodellen (insbesondere das Nationale Personenverkehrsmodell NPVM oder auch MATSim-Modelle) (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b, S. 3).

Das FaLC-Konzept wurde erstmals erfolgreich von 2012 bis 2014 an Hand eines vereinfachten Modells für die Schweiz auf Stufe der Gemeinden validiert («Proof of Concept»). Die Resultate sind im Schlussbericht (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b) zusammengefasst. Die Weiterentwicklung von FaLC läuft, der entsprechende Bericht *Weiterentwicklung Flächennutzungsmodellierung: Wohnstandortwahl, Erweiterung des Modells FaLC: Verhaltensmodelle und synthetische Population* (Bundesamt für

¹⁷ Siehe Abschnitt 3.8.2 *Synthetische Population und Agenten*

Raumentwicklung ARE, 2017 forthcoming) wird demnächst erwartet. Die für die vorliegende Simulation verwendeten Grundlagen entsprechen dem neuesten Stand.

3.8 Grundprinzipien FaLC

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Grundprinzipien und Ausgangslage jeder Simulation mit FaLC (in Anlehnung an Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b, S. 4-8,10). Die beschriebenen Grundprinzipien sind unabhängig vom spezifisch getätigten Eingriff.

Abbildung 7 zeigt das Grundprinzip des Agentenverhaltens in FaLC und wird in den drei nachfolgenden Abschnitten erläutert.

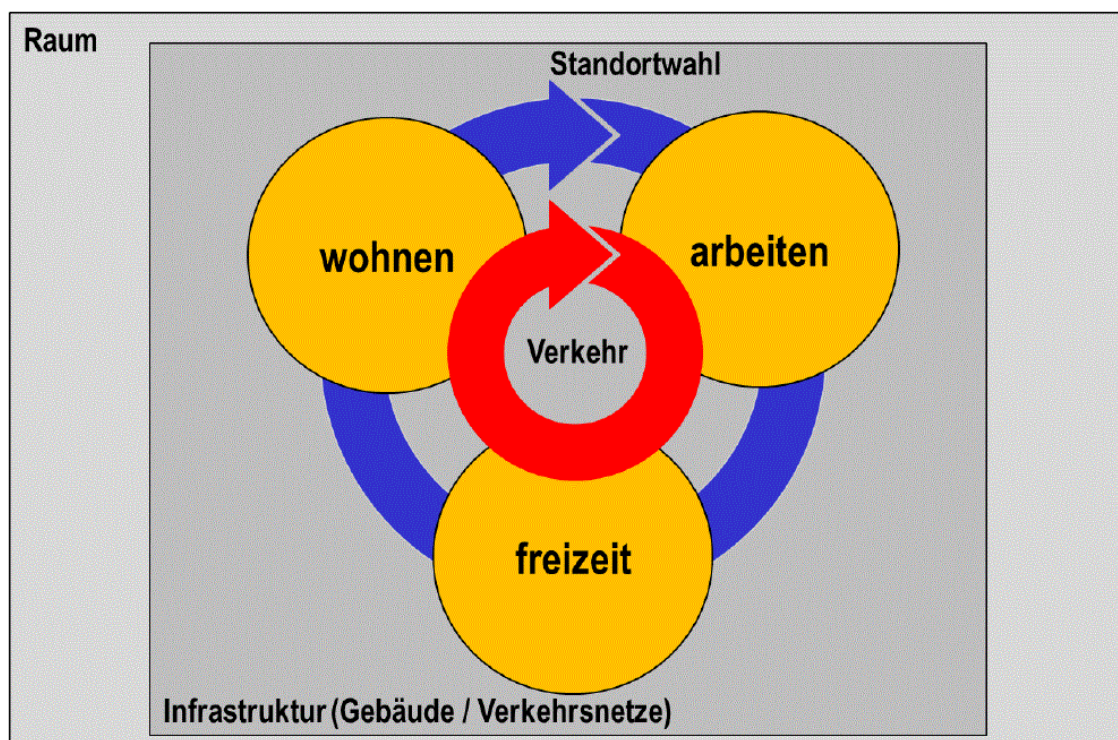


Abbildung 7: Modell des Agentenverhaltens in FaLC (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b)

3.8.1 Raum

Für die Simulation wird ein entsprechender Untersuchungsperimeter definiert, in dem vorliegenden Beispiel das Hoheitsgebiet der Schweiz. Der Untersuchungsperimeter weist in der Regel weitere, geografisch verortete Attribute auf, wie eine Zonenstruktur, Gebäude, Verkehrsinfrastrukturen oder Bauzonen. Die Attribute sind je nach gewünschtem Szenario frei zu wählen und zu kombinieren. Sie können auf bestehenden Datensätzen beruhen oder selbst erzeugt werden.

Die Zonenstruktur entspricht in vorliegendem Fall derjenigen des nationalen Personenverkehrsmodells (NPVM). Sie ist etwas feinmaschiger als die Gemeindestruktur der Schweiz und in Abbildung 8 dargestellt. Fortfolgend werden einzelnen Zonen *Locations* genannt, dies im Unterschied zu den *Municipalities*, welchen den administrativen Gemeindeeinheiten entsprechen. Abbildung 8 zeigt die Unterschiede zu den administrativen Gemeindegrenzen Stand 2010 (rot). Die grössten Städte werden weiter unterteilt in Stadtquartiere (lila), die wichtigsten Flughäfen haben separate Zonen (grün) und die Zonenstruktur fusionierter Gemeinden ab 2000 bleiben erhalten.

Insbesondere auf Grund von Gemeindefusionen gibt es eine fortschreitende Diskrepanz der administrativen Grenzen zu den *Locations* des Nationalen Personenverkehrsmodells (NPVM). Dies ist jedoch nur insofern von Bedeutung, als dass Resultate allenfalls der aktuellsten Gemeindestruktur zugeordnet werden müssen.

Da in der vorliegenden Untersuchung mit der aktuellsten *Gemeindetypologie und Stadt/Land-Typologie 2012* von 2017 (Bundesamt für Statistik BFS, 2017) gearbeitet, war es notwendig diese den *Locations* zuzuordnen.

Selbstverständlich kann FaLC auch die Gemeindestruktur direkt an Stelle der *Locations* abbilden. In vorliegendem Fall wurde jedoch die feinere Zonenstruktur der *Locations* verwendet.

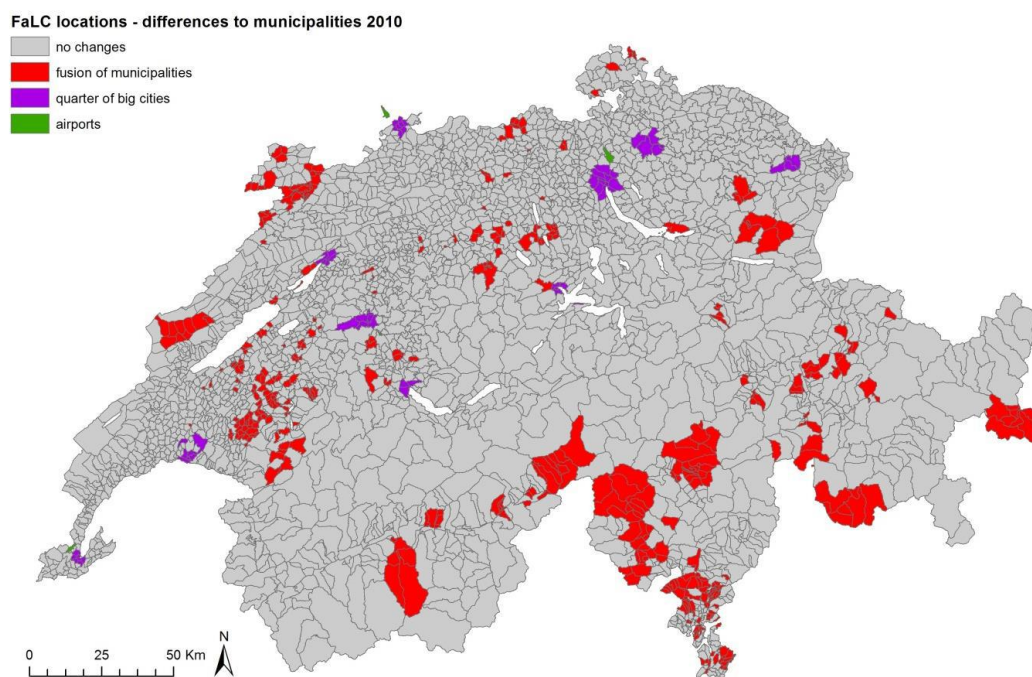


Abbildung 8: Unterschiede zwischen den Zonen des nationalen Personenverkehrsmodells² und den Gemeinden, Stand 2010. (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 10)

3.8.2 Synthetische Population und Agenten

Der Untersuchungsperimeter enthält eine synthetische Population, welche die Bevölkerung möglichst realitätsnah abbildet. Eine *synthetische* Population ist gemäss *Bundesamt für Raumentwicklung ARE* (2014, S.10) notwendig, weil Daten auf Mikroebene entweder nicht vorhanden oder aus rechtlichen Gründen, beispielsweise wegen des Datenschutzes, nicht verwendet werden dürfen.

Erzeugung der synthetischen Population: Die synthetische Basispopulation wird in FaLC an Hand der Daten von der eidgenössischen Volks- und Betriebszählung erzeugt (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b, S. 10). Derzeit stehen in FaLC synthetische Basispopulationen für die Jahre 2000 und 2014 zur Verfügung, weitere können bei Bedarf jederzeit erzeugt werden. Weniger aufwändig ist es jedoch, die dazwischenliegenden Jahre direkt mittels FaLC zu erzeugen.

In vorliegendem Fall beruht die synthetische Population für das Startjahr 2015 auf der Basispopulation von 2014.

Validierung der synthetischen Population: Die Validierung der synthetischen Populationen erfolgt mittels Randsummenvergleich mit den verwendeten Statistiken (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b, S. 18). Detaillierte Angaben zur Genauigkeit der synthetischen Populationen finden sich im Bericht *An Integrated Land Use Model for Switzerland. Detailed Description of the FaLC Template 2015. FaLC Working Paper 03* (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 34-44).

3.8.3 Agenten und Agenten-Aggregate

Die synthetische Population bildet die einzelnen Agenten für die Mikrosimulation ab. Die Anzahl der Agenten entspricht zum Simulations-Startzeitpunkt der Population des Untersuchungsperimeters.

Jeder Agent weist Attribute, wie Alter, Geschlecht, Einkommen, Bildungsgrad, Familienstand etc. auf. Sie entsprechen in der Summe der aus der Statistik vorgegebenen Verteilung (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b, S. 10). Somit hat jeder Agent ein unterschiedliches Nutzenprofil, anhand dessen er seine Entscheidungen trifft.

Die Agenten schliessen sich im Modell zu Haushalten (Familie, Wohngemeinschaft, etc.) und Firmen zusammen. Im weiteren Verlauf der Simulation werden die Agenten immer auf Stufe sogenannter Agentenaggregate abgebildet, als *Haushalt* oder als *Firma*.

3.8.4 Mobilität der Agenten-Aggregate

Während einer Simulation wohnen und arbeiten die Agenten im definierten Perimeter. Um Tätigkeiten nachgehen zu können, benutzen die Agenten unterschiedliche Einrichtungen, wie Gebäude oder Verkehrsinfrastrukturen. Diese Einrichtungen sind Bestandteil der Attribute, welche dem Raum zu Beginn zugewiesen worden sind.

In FaLC wird die Bewegung der Agenten über die Verkehrsinfrastrukturen abgebildet, d.h. beispielsweise über das verwendete Teilstück einer Zugstrecke. Das Teilstück weist ebenfalls Attribute auf, wie die erlaubte maximale Geschwindigkeit oder Kapazität. Einzelne Verkehrsmittel, wie Zug oder Auto, werden in der Simulation nicht dargestellt.

Die Aktivität der Agenten im Raum kann, je nach Bedarf, über verschiedene Grössen gemessen werden: Zeit oder Distanz über das Verkehrsnetz. Im vorliegenden Fall wird nur über die Zeit gemessen.

Es werden sowohl die alltäglichen Bewegungen der Agenten erfasst, wie beispielsweise die Fahrt zur Arbeit oder zum Supermarkt, aber auch die nicht alltäglichen Bewegungen, wie ein Umzug, ein Wechsel des Arbeitsorts oder eine Zuwanderung.

3.8.5 Zeitraum

Der zeitliche Betrachtungspunkt in FaLC liegt üblicherweise mehrere Jahre nach dem Startpunkt. Das Modell erlaubt es jedoch auch sehr kurze Zeiträume, wie einige Monate abzubilden. In der vorliegenden Untersuchung liegt der Betrachtungszeitraum am 13.12.2024, 10 Jahre nach dem Startjahr (1.1.2015)

3.8.6 Interaktion Verkehr und Nutzer

In FaLC sind gemäss *Bundesamt für Raumentwicklung ARE* (2014, S.10) Verkehrsinfrastruktur und Nutzer gleich mehrfach miteinander verknüpft:

Jährlich werden aufgrund der Fahrzeiten und der aktualisierten Bevölkerungs- und Arbeitsplatzverteilung neue Erreichbarkeiten¹⁸ berechnet. Das bedeutet, dass die Agenten-Aggregate beispielsweise auf regelmässige Verkehrsüberlastung reagieren und ihr Verhalten im nächsten Jahr anpassen.

Auch Szenarien, z.B. eine neue Umfahrungsstrasse, können getestet werden und haben direkt oder indirekt einen Einfluss auf die Standortentscheide der Haushalte (Nähe zum

¹⁸ Siehe Abschnitt 2.3.1 zu Erreichbarkeit

Arbeitsplatz und zum bisherigen Wohnumfeld) und der Unternehmen (Nähe zu bisherigem Standort oder Agglomerationseffekte). Damit werden verkehrliche Inputs räumlich sichtbar.

Ferner sind verkehrliche Einflüsse auch nachgeordnet zwischen den verschiedenen Modellen abgebildet. Beispiel: Wird die Erreichbarkeit eines Standorts für Firmen wegen einer neuen Umfahrungsstrasse erhöht, zieht dies nachgeordnet wiederum Haushalte an, da diese die Nähe zum Arbeitsplatz suchen.

3.9 Ablauf einer Simulation in FaLC

In diesem Abschnitt wird der Ablauf einer Simulation an Hand der Modellstruktur und der jährlichen Zyklen erläutert. Die Inhalte orientieren sich an *Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2014), S. 5-7*.

3.9.1 Basismodelle

Abbildung 9 zeigt eine Übersicht der Basismodelle (gelbe Kästchen), welche in der Simulation verwendet werden, um die «Rahmenbedingungen, Einflüsse und Entscheidungen der längerfristigen Zusammenhänge zwischen Agenten und Zonen abzubilden.» (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b) (S.5)

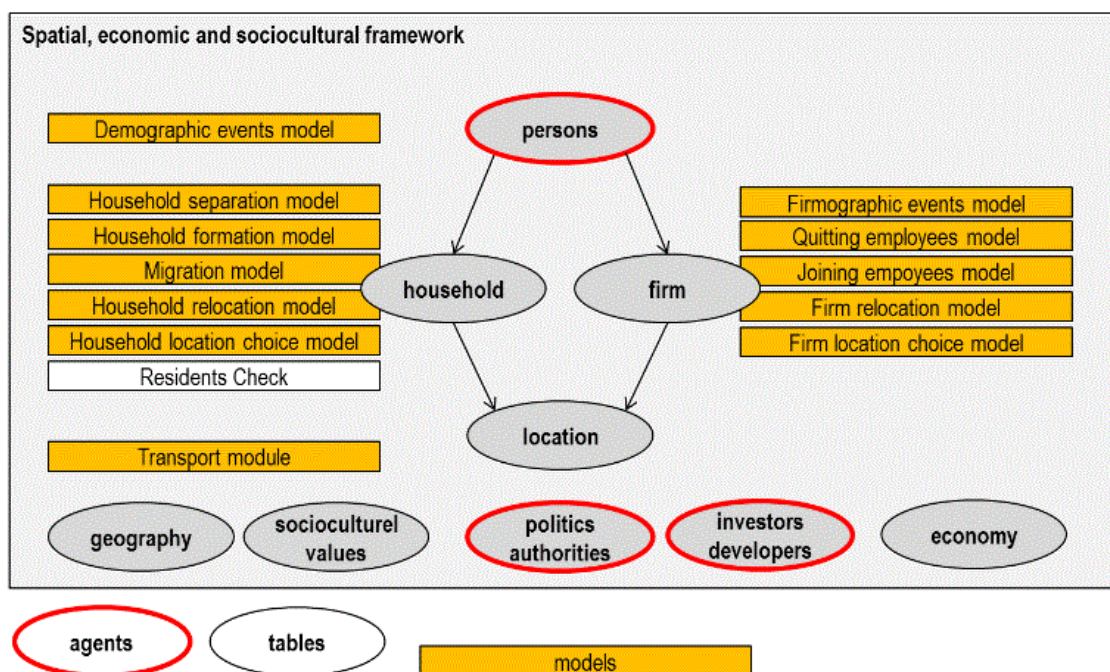


Abbildung 9: Jährliche Basismodelle (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2014b, S. 5)

Die Basismodelle stellen jeweils einen räumlichen, ökonomischen oder soziokulturellen Entscheidungsrahmen dar und entsprechen einer der drei folgenden Methoden von Tabelle 3.

Modell	Beispiel
Wahrscheinlichkeitsmodell mit Monte-Carlo-Simulation	sterben oder nicht sterben
Diskretes Entscheidungsmodell mit Monte-Carlo-Simulation	Eine Wahl treffen zwischen mehreren Optionen (Basel, Bern, Zürich)
komplexere Modell-Systeme (Kombination mehrerer Sub-Modelle)	Transportsysteme

Tabelle 3: Methoden der Basismodelle in FaLC (Grundlage: Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 6)

3.9.2 Das Grundprinzip der jährlichen Zyklen

In FaLC werden sowohl die Basis- als auch die ergänzenden Modelle in jährlichen Zyklen sequentiell abgearbeitet: Hierbei ist die Reihenfolge der Modelle je nach Modell relevant oder nicht. Damit neue Haushalte entstehen können, müssen sich vorher beispielsweise einige aufgelöst haben.

Jeweils zu Beginn eines neuen Zyklus' (in der Regel zu Beginn eines Jahrs) wird mit Hilfe des demographischen Modells («demographic events model») die Gesamtheit der Agenten-Aggregate (Haushalte und Firmen) aktualisiert: Auf der Seite der Haushalte wird Tod und Geburt aktualisiert und firmenseitig werden Neugründungen, Schliessungen und Wachstum angepasst. Auch die Infrastruktur (Gebäude, Verkehrsnetze) wird wenn nötig aktualisiert.

Basismodelle: Die Agenten durchlaufen die Basismodelle, entweder auf der Haushaltsseite oder auf der Firmenseite, wie in Abbildung 9 dargestellt.

Auf Seite der Haushalte werden die Agenten-Aggregate wie folgt aktualisiert: Haushaltstrennung (*Household separation model*), Haushaltsneubildung (*Household formation model*), Migration (*Migration model*).

Auf Seite der Firmen werden die Agenten-Aggregate wie folgt aktualisiert: Stellenaufhebung resp. Kündigung des Arbeitsplatzes (*Quitting employees model*), Stellenantritt (*Joining employees model*).

Für die vorliegende Untersuchung interessiert schliesslich besonders ein möglicher Umzug von Haushalten oder Firmen. Dieser wird zweistufig ermittelt: Zuerst wird auf beiden Seiten (Haushalt und Firma) im Umzugsmodell (*Firm / Household relocation model*) geprüft, ob ein Umzug stattfindet. Etwa 5% aller Haushalte entscheiden sich jährlich für

einen Umzug. Ist der Entscheid positiv, wird die Wahl des neuen Standorts in einem zweiten Schritt mittels Nutzenfunktion individuell im Standort-Wahl-Modell (*Household / Firm location choice model*) ermittelt.

Weitere Modelle und Variablen: Nebst den hier beschriebenen Basismodellen werden weitere Modelle, spezielle Ereignisse oder Bedingungen, wie beispielsweise die volkswirtschaftliche Entwicklung oder Regulationsmechanismen, als exogene Variablen berücksichtigt.

Für die vorliegende Simulation wurden ein Modell und mehrere Variablen zusätzlich zu den Basismodellen verwendet resp. modifiziert. Einerseits wird ein Modell hinzugefügt, das die Erreichbarkeitswerte jeder Location entsprechend des gewählten Szenarios anpasst. Andererseits werden je nach Szenario auch andere Inputdaten ausgelesen. Der Beschrieb der Eingriffe folgt unter 4.2 *Szenarien in FaLC*.

3.10 Validierung Resultate in FaLC

Im Folgenden werden die Instrumente vorgestellt, die FaLC zur Validierung der Resultate zur Verfügung stellt.

3.10.1 Validierung Resultate retrospektiv

Die Resultate können über ein Analyse-Werkzeug, das FaLC zur Verfügung stellt, einfach mit der entsprechenden Statistik des Bundesamts für Statistik BFS verglichen werden. Dies ist nur rückwirkend möglich, wenn die entsprechende Statistik bereits verfügbar ist.

Bei der vorliegenden Untersuchung wurde mit dieser Methode die synthetische Population des Basisjahrs 2014 validiert. Die Resultate des Betrachtungsjahrs 2024 können mit dieser Methode hingegen nicht validiert werden.

3.10.2 Validierung von in der Zukunft liegenden Resultaten

Die Resultate von zukunftsgerichteten Simulationen können nicht abschliessend validiert werden, da die zur Verfügung stehenden Prognosen (z.B. Bevölkerungsentwicklung) höchstens auf Bundes- oder Kantonsebene verfügbar sind. Gemeindescharfe Prognosen gibt es nicht.

Für die vorliegende Simulation wird daher ein vergleichender Ansatz an Hand von Szenarien und einem Basisszenario gewählt.

3.11 Statistische Güte von FaLC

3.11.1 Determinationskoeffizient

Detaillierte Untersuchungen zur statistischen Güte von FaLC Simulationen liegen für den Zeitraum von 2000 bis 2010 vor und sind in Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler (2015) zusammengefasst. Es wurde der Endzustand der Simulation (2010, Einwohner und Angestellte der Schweiz) mit den offiziellen Daten des Bundesamts für Statistik BFS verglichen und der Determinationskoeffizient (R^2) ermittelt. Der Determinationskoeffizient (R^2) ist ein Mass der statistischen Güte und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei ein hoher Wert auf eine hohe Güte hinweist. Er zeigt in diesem Fall auf, wie gut die simulierten Daten zu den realen Vergleichswerten passen.

Abbildung 10 zeigt die Werte der Einwohner im Jahr 2010. Je näher die Datenpunkte an der Regressionsgeraden liegen, desto höher ist der Determinationskoeffizient. Die drei Diagramme auf der rechten Hälfte stellen unterschiedliche Werte für unterschiedliche Altersgruppen dar.

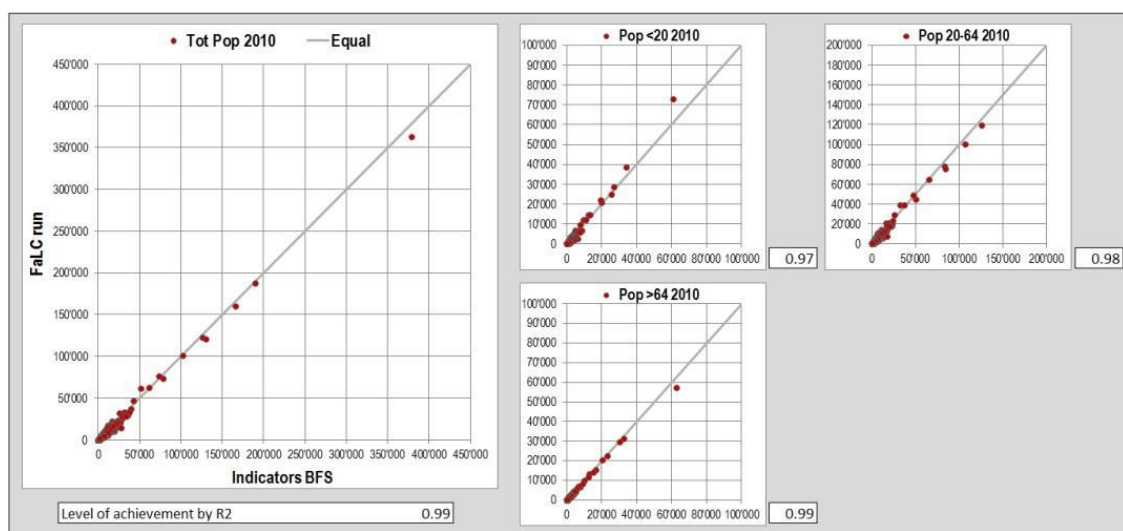


Abbildung 10: Vergleich der in FaLC errechneten Werte (Y-Achse) mit den Werten des Bundesamts für Statistik BFS (X-Achse) für das Jahr 2010 (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 36)

Die ermittelten Werte sind in Tabelle 4 dargestellt und weisen auf eine hohe Güte der Modellberechnungen hin. Werte so nahe bei 1.00 werden selten erreicht.

Einwohner 2000-2010, Betrachtung 2010	R^2 0.99
Angestellte 2000-2010, Betrachtung 2010	R^2 1.00

Tabelle 4: Determinationskoeffizient (R^2) der Einwohner und Angestellten der Schweiz nach einer FaLC-

Simulation von 2000-2010 im Vergleich zu den offiziellen Daten des Bundesamts für Statistik (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 35)

3.11.2 Weisses Rauschen

Die Resultate verschiedener Rechenläufe sind in der Regel nicht identisch. Es zeigt sich jedoch, dass die Resultate ähnlicher werden, je höher die Eintrittswahrscheinlichkeiten sind. Wichtiger Treiber dafür sind die vielen Monte-Carlo-Simulationen, die in den verschiedenen Basismodellen angewendet werden (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 34-44). Die Monte-Carlo-Simulationen sind ein Verfahren aus der Stochastik um komplexe Probleme, die analytisch nicht oder nur aufwändig lösbar sind, an Hand von Zufallsexperimenten zu simulieren. Dafür werden die Wahrscheinlichkeitsmodelle in der vorliegenden Untersuchung («Basismodelle») mit Pseudozufallszahlen simuliert (statt echtem Würfeln) (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 34-44).

Abbildung 11 zeigt die abnehmende Streuung des Durchschnitts der Resultate bei zunehmender Wiederholung identischer Läufe. Bei einem Konfidenzintervall von 95% erreichen die Bevölkerungszahlen der Locations nach einer Rechenzeit von 10 Jahren eine Genauigkeit von +/- 13 Personen bei 50 Läufen, bei 100 Läufen von +/- 5 Personen und bei 200 Läufen von +/- 3 Personen. Dass die Abweichungen bei kleinen wie auch bei grossen Locations fast gleich sind, liegt daran, dass alle Locations ähnlich oft in Zufallsexperimente involviert werden (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2017 forthcoming, S. 175).

Es bedarf folglich einer genügend grosser Anzahl Wiederholungen der Wahrscheinlichkeitsexperimente, bis die Resultate zuverlässig die gegebene Wahrscheinlichkeit nachbilden. Für die vorliegende Simulation wurden daher alle Szenarien fünfzigfach und das Basisszenario zweihundertfach wiederholt. Für die Auswertung wurde das arithmetische Mittel aller Resultate verwendet.

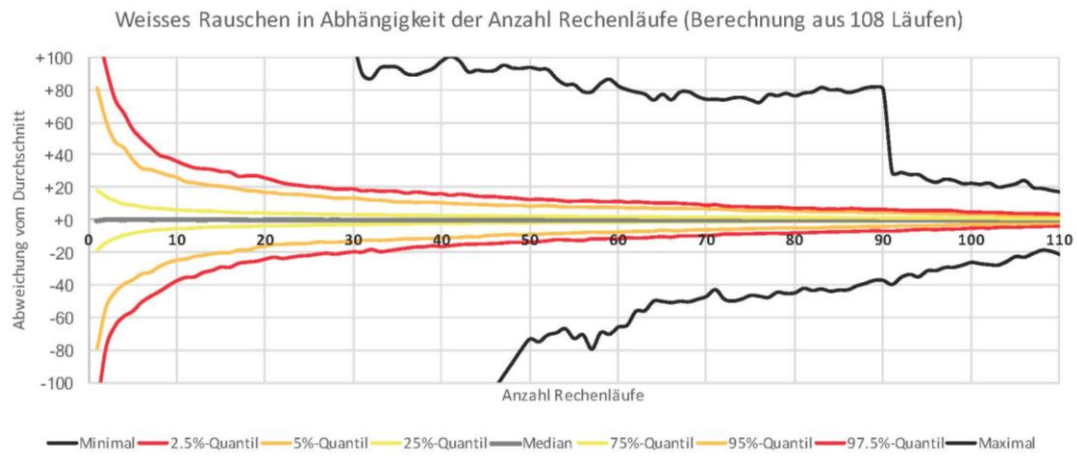


Abbildung 11: Weisses Rauschen in FaLC in Abhängigkeit der Anzahl paralleler Läufe (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2017 forthcoming, S. 175)

4. Beschrieb der Simulation: Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge

Im Folgenden werden alle Inputdaten, Szenarien, Eingriffe und Vorgehensweisen der Simulation beschrieben.

4.1 Inputdaten Erreichbarkeitswerte: Herkunft und Beschrieb

Die verwendeten Erreichbarkeitswerte stammen vom Institut für Verkehrsplanung (IVT) der ETH Zürich. Die Resultate wurden im Artikel *Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities* in der Zeitschrift *Research in Transportation Economics*? (Meyer, Becker, Bösch, & Axhausen, 2017) veröffentlicht.

Die Untersuchung des IVT zeigt an Hand dreier Szenarien auf, wie sich die Erreichbarkeit jeder Verkehrszone ändert, wenn die Strassenkapazitäten des Verkehrsnetzes durch autonome Fahrzeuge entsprechend erhöht wurden. Dabei wird für jedes der drei Szenarien eine Variante mit konservativer und eine Variante mit hoher Kapazitätszunahme gerechnet.

4.1.1 Grundlagen für Szenarien mit konservativer Kapazitätszunahme

Die Kapazitätserhöhungen der konservativen Szenarien beruhen auf theoretischen Verkehrsflussanalysen von Friedrich (2015). Friedrich (2015) erwartet «[...] für eine Welt mit ausschliesslich vollautomatisierten Fahrzeugen gegenüber heute Kapazitätsgewinne bis zu 78% auf Autobahnen und 40% auf urbanen Strassen». (Meyer, Bösch, Becker, & Axhausen, 2016, S. 2) Die Kapazitätsgewinne entstehen demnach «[...] im Wesentlichen durch kürzere Reaktionszeiten der autonomen Fahrzeuge, die aber nach wie vor dieselben Dimensionen und für Menschen akzeptable Minimalabstände aufweisen.» (Meyer, Bösch, Becker, & Axhausen, 2016, S. 2)

4.1.2 Grundlagen für Szenarien mit hoher Kapazitätszunahme

Im Unterschied zu den Annahmen von Friedrich (2015) minimiert Tientrakool (2011) die Fahrzeugabstände auf das technisch mögliche und passt die Fahrzeugdimensionierung an. Damit werden mit vollautomatischen und vollvernetzten Fahrzeugen Kapazitätsgewinne von 270% auf Autobahnen möglich. Zu urbanen Strassen macht Tientrakool (2011) keine Aussage zu Kapazitätsgewinnen. Es wurden daher ebenfalls die Werte von Friedrich (2015) (+40%) verwendet.

4.1.3 Betrachtungszeitpunkt

Die errechneten Erreichbarkeitswerte beruhen auf der Abendspitzenstunde¹⁹ (17:00 bis 18:00 Uhr) (Meyer, Bösch, Becker, & Axhausen, 2016, S. A-4).

4.1.4 Generalisierte Kosten

Der Aufwand zur Raumüberwindung wurde an Hand der Reisezeit dargestellt.

4.1.5 Szenario 1

Die Vorteile [erhöhte Strassenkapazität, Anm. d. Verf.] autonomer Fahrzeuge können nur ausserorts auf Autobahnen und Hauptstrassen realisiert werden. Ein Führerausweis wird weiterhin benötigt, daher wurde keine Änderung der Nachfrage angenommen.

4.1.6 Szenario 2

Autonome Fahrzeuge können in jeder Situation vollautonom betrieben werden, d.h. auch innerhalb von Städten. Die Fahrzeuge bleiben jedoch in Privatbesitz und werden zum privaten Gebrauch genutzt. Neue Nutzergruppen können das Angebot nutzen, da kein Führerausweis mehr benötigt wird (+16% Verkehrsnachfrage), Leerfahrten werden möglich (+1.5 Leerfahrten pro Person und Tag) (Meyer, Becker, Bösch, & Axhausen, 2017, S. 6).

Da die Kosten für autonome Taxis gemäss *Cost-based Analysis of Autonomous Mobility Services* (Bösch, Becker, Becker, & Axhausen, 2017) tiefer liegen, als die eines autonomen Fahrzeugs in Privatbesitz, ist zu erwarten, dass autonome Taxis längerfristig eine interessante Option für Fahrzeugbesitzer werden. Dies leitet zu Szenario 3 über.

4.1.7 Szenario 3

In Szenario 3 können autonome Fahrzeuge in jeder Situation vollautonom betrieben werden. Die Fahrzeuge sind Bestandteil einer geteilten Flotte und nicht mehr in Privatbesitz. Sie werden mittels eines Sharing-Systems abgerufen. Das Angebot entspricht demjenigen heutiger Taxis. Auf Grund der veränderten Kostenstruktur²⁰ scheint es wahrscheinlich, dass die Fahrzeuge trotzdem individuell, d.h. nicht als Fahrgemeinschaft, genutzt werden. Es wurde angenommen, dass das Angebot langfristig auch die gesamte Nachfrage nach öffentlichem Verkehr abdeckt, nur Fussgänger/-innen und Radfahrer/-innen verändern ihr Verhalten nicht. Die Leerfahrten des Sharing-Systems sind mit 15% veranschlagt.

¹⁹ Die Abendspitzenstunde mit der Morgenspitzenstunde ist die Zeit mit dem grössten Verkehrsaufkommen (werktags). Sie zeigt den Zustand mit der grössten Belastung des Verkehrsnetzes. Siehe auch 2.3.3 *Auslastung des Verkehrsnetzes*.

²⁰ Siehe Abschnitt 2.2 *Raumwirksame Effekte autonomer Fahrzeuge*

4.1.8 Integrierung der Szenarien in FaLC

Im integrierten Verkehrs- und Raumnutzungs-Simulationstool (FaLC) werden dieselben drei Szenarien, wie für die Untersuchung *Autonomous Vehicles: The next jump in accessibilities?*, nachgebildet, ebenfalls jeweils in einer konservativen und einer hohen Variante (Meyer, Becker, Bösch, & Axhausen, 2017).

4.2 Szenarien in FaLC

4.2.1 Bezeichnung der Szenarien

Die Szenarien sind nummeriert von 1-3 und ergänzt um die Ziffer 1 für die konservative Kapazitätzunahme oder 2 für die hohe Kapazitätzunahme.

4.2.2 Szenario 1 in Variante 1.1 und 1.2

Es werden die entsprechenden Erreichbarkeitswerte aus Meyer et.al (2017) in FaLC integriert. Die Komponente wird fortan mit *ERR* bezeichnet.

Variante 1.1 verwendet die konservativen Erreichbarkeitswerte basierend auf Friedrich (2015) (Strassenkapazität +78% auf Autobahnen und Hauptstrassen ausserorts). Variante 1.2 verwendet die hohen Erreichbarkeitswerte basierend auf Tientrakool (2011) (Strassenkapazität +270% auf Autobahnen und Hauptstrassen ausserorts).

4.2.3 Szenario 2 in Variante 2.1 und 2.2

Auch in Szenario 2.1 und 2.2 werden die Erreichbarkeitswerte aus Meyer et al (2017) in FaLC integriert.

Die Erreichbarkeitswerte des öffentlichen Verkehrs bleiben im Szenario 2 unverändert, obwohl in diesem Zwischenschritt autonome Sammelfahrzeuge denkbar und bei hoher Belegungsdichte möglicherweise effizient operieren können. Dieser Entschluss beruht auf der Überlegung, dass eine autonome Taxiflotte so günstig betrieben werden könnte, dass ein Grossteil der Nachfrage nach «öffentlichem Verkehr» mit individuellen, autonomen Taxifahrten befriedigt werden könnte und dass sich das verbleibende Angebot an Sammelfahrzeugen stark von dem heutigen Angebot unterscheidet.

Variante 2.1 verwendet die konservativen Erreichbarkeitswerte basierend auf Friedrich (2015) (Strassenkapazität +78% auf Autobahnen und Hauptstrassen ausserorts und +40% innerorts). Variante 1.2 verwendet die hohen Erreichbarkeitswerte basierend auf Tientrakool (2011) (Strassenkapazität +270% auf Autobahnen und Hauptstrassen ausserorts und +40% innerorts).

4.2.4 Szenario 3 in Varianten 3.1 und 3.2

Das dritte Szenario bedarf weiteren Anpassungen, als nur der Anpassung Erreichbarkeitswerten, da sich das Agentenverhalten grundsätzlich vom Standardsetting unterscheidet.

In Szenarien 3.1 und 3.2 werden von Beginn an zusätzliche Parameter verändert. Der Entscheid dafür liegt darin, dass das konventionelle Verkehrskonzept unter Annahme einer autonomen Taxiflotte einer Anpassung bedarf.

Die separate Gewichtung von der Erreichbarkeit mit dem öffentlichen Verkehr und mit dem motorisierten Individualverkehr wird nach der Kostenanalyse von Bösch (2017) hinfällig. Es werden daher Werte des öffentlichen Verkehrs mit denen des motorisierten Privatverkehrs mittels eines Skripts ersetzt. Die Neubewertung wird mit der Komponente VAR abgebildet. Das Skript befindet sich im Anhang Nr. 2. Der Befehl betrifft Zeile 38 bis 43.

Auch das massgeschneiderte Mobilitätsangebot, die örtlich und zeitlich ständig verfügbaren Fahrzeuge, müssen abgebildet werden. Dies wird mit einem Austausch eines Datenfiles dargestellt. Alle Locations erhalten damit einen Bahnhof. Standardmässig sind in FaLC jene Locations im integrierten, hedonischen Bewertungsmodell besser bewertet, die über einen Bahnhof verfügen. Wenn eine geteilte, autonome Flotte implementiert ist und unter der Annahme, dass sie überall und jederzeit zu günstigen Konditionen zur Verfügung steht, schwächt sich dieser Vorteil ab. Welche Location davon in welchem Ausmass betroffen sind, lässt sich heute nicht prognostizieren. Daher wurde allen Locations ein Bahnhof zugewiesen. Dies ist eine starke Vereinfachung, zeigt aber die Bedeutung auf. Die Resultate sollten nur als Tendenz verstanden werden. Die Komponente ist als *BHF* bezeichnet.

Variante 3.1 verwendet die konservativen Erreichbarkeitswerte basierend auf Friedrich (2015) (Strassenkapazität +78% auf Autobahnen und Hauptstrassen ausserorts und +40% innerorts). Variante 1.2 verwendet die hohen Erreichbarkeitswerte basierend auf Tientrakool (2011) (Strassenkapazität +270% auf Autobahnen und Hauptstrassen ausserorts und +40% innerorts).

4.2.5 Subszenarien 3.2s, 3.2i, 3.2l

Unter der Annahme, dass eine autonome, geteilte Flotte implementiert ist, soll in den Subszenarien untersucht werden, ob tendenziell eher städtische oder ländliche Gebiete bevorzugt nachgefragt werden.

Die Subsznarien von Szenario 3.2 erhalten den Suffix l für ländlich, i für intermediär und s für städtisch.

Konzept: Damit die Nachfragetendenz in einer Schweiz mit autonomen Fahrzeugen abgebildet werden kann, erhält jede Kategorie, städtisch, intermediär und ländlich, separat 20% grössere Bauzonen. Damit wird erreicht, dass bei einem Umzug der Agenten vermehrt auch wieder Locations gewählt werden können, deren Bauzonen im Basisszenario bereits stark ausgelastet sind.

Die Eingriffe werden als Subsznarien von Szenario 3.2 (autonome Flotte, hohe Kapazitätssteigerung) durchgeführt.

SubszENARIO 3.2l: Alle ländlichen Gemeinden erhalten 20% grössere Bauzonen

SubszENARIO 3.2i: Alle intermediären Gemeinden erhalten 20% grössere Bauzonen

SubszENARIO 3.2s: Alle städtischen Gemeinden erhalten 20% grössere Bauzonen

Grösse der Bauzonen: In Tabelle 5 sind die tatsächlich verfügbaren Flächen für Wohnzwecke nach Kategorie zusammengestellt. Städtische Locations haben den grössten Flächenanteil mit 51% resp. 554 km². Die modifizierten Flächen sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Bauzonenfläche für

Wohnzwecke

per 01.01.2015 (Ausgangslage)

		Anteil
Städtische Locations	554 km ²	51%
Intermed. Locations	282 km ²	26%
Ländliche Locations	240 km ²	22%
Total	1'076 km²	100%

Tabelle 5: Verfügbare Bauzonenflächen für Wohnzwecke nach Kategorie (Ausgangslage)

Modifizierte

Bauzonenfläche für

Wohnzwecke

per 01.01.2015

	Städtische Locations +20%		Intermed. Locations +20%		Ländliche Locations +20%	
Städtische Locations	665 km²	+20%	554 km ²	±0%	554 km ²	±0%
Intermed. Locations	282 km ²	±0%	338 km²	+20%	282 km ²	±0%
Ländliche Locations	240 km ²	±0%	240 km ²	±0%	288 km²	+20%
Total	1'187 km²	-	1'132 km²	-	1'124 km²	-
<i>Diff. zur Ausgangslage</i>	<i>+111 km²</i>	<i>+10%</i>	<i>+56 km²</i>	<i>+5%</i>	<i>+48 km²</i>	<i>+4%</i>

Tabelle 6: Modifizierte Bauzonenflächen für Wohnzwecke nach Kategorie

Die resultierende, zusätzliche Fläche beträgt bei städtischen Locations $+111\text{km}^2$, bei intermediären Locations $+56\text{km}^2$ und bei ländlichen Locations $+48\text{km}^2$. Dies ist bei der Interpretation der Resultate zu berücksichtigen.

Funktionsweise Bauzonen in FaLC allgemein: In FaLC sind die Bauzonengrößen jeder Location abgebildet. Jede Person, jede Firma, die in einer Location angesiedelt ist und dahinziehen möchte, beansprucht dafür eine gewisse Anzahl Quadratmeter der verfügbaren Bauzonen.

Wie in der Realität, führen stark ausgelastete Bauzonen dazu, dass eine Location bei einem Umzug nicht mehr gewählt werden kann, obwohl die Nachfrage da wäre. Dies kann in FaLC insbesondere bei städtischen Locations der Fall sein.

Grenzen des Eingriffs: Verfügt eine Location bereits ohne Eingriff über ausreichend Baulandreserven, ist das Potential weiterer 20% Bauland beschränkt. Da die kantonalen Bestimmungen zur Ermittlung der unüberbauten Bauzonen sehr unterschiedlich sind, gibt es keine einheitlichen und gemeindefeinen Angaben zu den Reserven (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2013, S. 2). Die Analyse des Bundes zeigt jedoch, dass tendenziell in ländlichen und touristischen Gebieten die Baulandreserven grösser sind als in städtischen Gebieten (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2013, S. 25).

4.3 Technischer Beschrieb Implementierung Erreichbarkeitswerte in FaLC

4.3.1 Bedeutung der Erreichbarkeitswerte für die Wohnstandortwahl in FaLC

Während der Simulation durchlaufen alle Agenten die verschiedenen Modelle, wie unter Abschnitt 3.9 *Ablauf einer Simulation in FaLC* beschrieben. Haben sie sich im ersten Schritt für einen Umzug entschieden (ca. 5% der Bevölkerung jährlich), geht es im zweiten Schritt darum zu entscheiden, wohin der neue Wohnstandort gelegt werden soll. Dafür bewertet der Agent in Abhängigkeit von seiner persönlichen Situation eine Auswahl von ca. 350 Locations²¹. Wie hoch die verschiedenen Agenten die Erreichbarkeit einer Location gewichten, ist abhängig von weiteren Attributen der Agenten. Zum Beispiel, ob ein Agent Mieter oder Eigentümer ist oder ob er Single ist oder in einer Partnerschaft lebt. (Schirmer & Matter, 2016, S. 86-91). Die Erreichbarkeit einer Location ist ein Attribut

²¹ Eine Reduktion auf ca. 350, in FaLC als «subset of relevant locations» bezeichnet, reduziert die Rechenzeit um das zehnfache. Die Auswahl ist abhängig vom bisherigen Wohn- oder Firmenstandort. (Bodenmann, Bode, Sanchez, & Zeiler, 2015, S. 27-28)

jeder Location und wird von den Agenten bewertet. Erhält eine Location höhere Erreichbarkeitswerte, wird sie eher als Wohnstandort gewählt. Langfristig ziehen mehr Agenten in diese Location.

Wie hoch die Gewichtung der Erreichbarkeit in der generellen Nutzenfunktion abgebildet ist, das heisst, wie viel Bedeutung die Erreichbarkeit auf den Umzugsentscheid hat, lässt sich im Vergleich zu weiteren Attributen aufzeigen. Die Gewichtung der Distanz zum vorherigen Wohnort oder des Vorhandenseins eines Bahnhofs ist zehnmal wichtiger.

4.3.2 Ermittlung Standarderreichbarkeitswerte in FaLC

In FaLC wird zu Beginn jeder Simulation ein Erreichbarkeitswert für jede Location ermittelt. Anschliessend wird für diese Untersuchung dieser Wert mittels eines Skripts so modifiziert, dass er zusätzlich die Veränderungen der Erreichbarkeitswerte wegen autonomer Fahrzeuge abbildet.

4.3.3 Modifikation der Erreichbarkeitswerte in FaLC mittels Skript

In einem ersten Schritt wurden die Erreichbarkeitsgewinne aus Meyer, Becker, Bösch, & Axhausen (2017) in einen Multiplikator umgewandelt. Beispiel: Aus einem Erreichbarkeitsgewinn von +30% für eine Location wird Faktor 1.3. Für jedes Szenario wurde so dann eine Datei mit allen Faktoren für jede Location erstellt und in FaLC abgelegt, damit sie bei Bedarf ausgelesen werden können.

Die Analyse der Faktoren (Mittelwerte, Streuung und Vergleich der Szenarien) befindet sich im Anhang Nr. 1.

Die Modifikation der Erreichbarkeitswerte einer Location findet schliesslich mittels Skript statt, welches in FaLC in die bestehenden Modelle der jährlichen Zyklen integriert wurde. Es an zweiter Stelle nach dem allgemeinen Erreichbarkeits-Update positioniert.

Das heisst, FaLC ermittelt zu Beginn der Simulation vorerst die Standarderreichbarkeit jeder Location, die dann im nächsten Schritt als Basis für den Multiplikator dient. Für die Folgejahre wird der Multiplikator nicht mehr benötigt.

Das Skript befindet sich im Anhang Nr. 2. Die Befehle zur Modifikation der Erreichbarkeitswerte betreffen Zeile 18 bis 36.

Das Skript enthält zudem für die Szenarien 3.1 und 3.2 weitere Befehle. Siehe dazu Abschnitt 4.2.4 *Szenario 3 in Varianten 3.1 und 3.2*.

4.4 Konzept Analyse

4.4.1 Unterschiedliche Containergrössen

Ziel ist der Vergleich der Resultate aus den Szenarien mit den Resultaten aus dem Basisszenario. Eine Herausforderung bilden dabei die unterschiedlichen Containergrössen. Alle Locations haben verschiedene Bevölkerungsstände. Gewisse Locations haben sehr viele Einwohner und gewisse Locations sehr wenige. Abbildung 12 schafft einen Überblick über die unterschiedlichen Containergrössen (Bevölkerungsgrössen der Locations). Es wurden 2949 Locations (die ganze Schweiz) berücksichtigt.

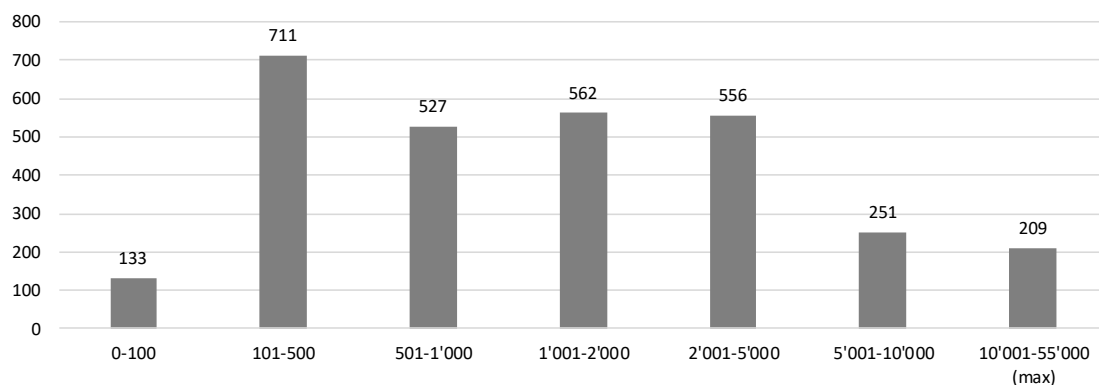


Abbildung 12: Anzahl Locations (y) nach Bevölkerungsgrösse (x), Basisszenario 2024

Möchte man die Veränderungen aller Locations in einen Zusammenhang setzen, z.B. als Karte, zeigen sich wegen der unterschiedlichen Containergrössen je nach Darstellungsart (absolut oder relativ) unterschiedliche Bilder.

Absolute Betrachtungsweise: Bei gleichem Input zeigen Locations mit vielen Bewohnern zeigen tendenziell grosse Veränderungen der Personenzahl und Locations mit wenigen Bewohnern entsprechend kleine Veränderungen. Eine fiktive Karte würde grosse Bevölkerungsveränderungen in grossen (städtischen) Locations zeigen, kleine (ländliche) Locations blieben quasi unverändert.

Relative Betrachtungsweise: Vergleicht man die relative Veränderung pro Location zeigt sich ein gegenteiliges Bild. Die Fehlerquote von +/- 16 Personen pro Location (95% Konfidenzintervall) führt zu einer gewissen unvermeidbaren Streuung der Resultate. Bei kleinen Locations führen diese Fehler bereits zu grossen prozentuellen Ausschlägen. Beispiel: Eine Location hat 50 Einwohner, die Fehlerquote beträgt +/- 16 Personen. Das sind +/- 32% Prozent. Eine fiktive Karte würde grosse Bevölkerungsveränderungen in kleinen (ländlichen) Locations zeigen, grosse (städtische) Locations blieben quasi unverändert.

4.4.2 Vorgehen: Gliederung der Locations nach Raumkategorien

Statt die Resultate nach Location zu gliedern, werden die Resultate aggregiert nach Raumkategorie dargestellt.

Hinsichtlich der Annahme, dass autonome Fahrzeugen in ländlichen Gebieten grosses Potential haben, wird für die Analyse eine Raumgliederung gesucht, die die Schweizer Gemeinden in ländliche und andere Kategorien aufteilt. Dafür bietet sich die aktualisierte Gemeindetypologie des Bundesamts für Statistik (2017) *Stadt/Land-Typologie 2012* an. Die Typologie ordnet jede Gemeinde einer der drei Kategorien städtisch, intermediär und ländlich zu. Diese drei Kategorien ersetzen die frühere Zweiteilung, die städtisch den Agglomerationen inkl. der isolierten Städte zugeordnet hatte und ländlich den restlichen Gebieten. Die Experten waren sich einig, dass eine Zweiteilung Stadt/Land nicht mehr zeitgemäss sei, dass es Räume gäbe, die sowohl ländliche als auch städtische Merkmale aufwiesen. Das ist die Grundlage der dritten Kategorie, intermediär (Bundesamt für Statistik BFS, 2017, S. 12-14).

Abbildung 13 zeigt die Kategorisierung aller Gemeinden der Schweiz.

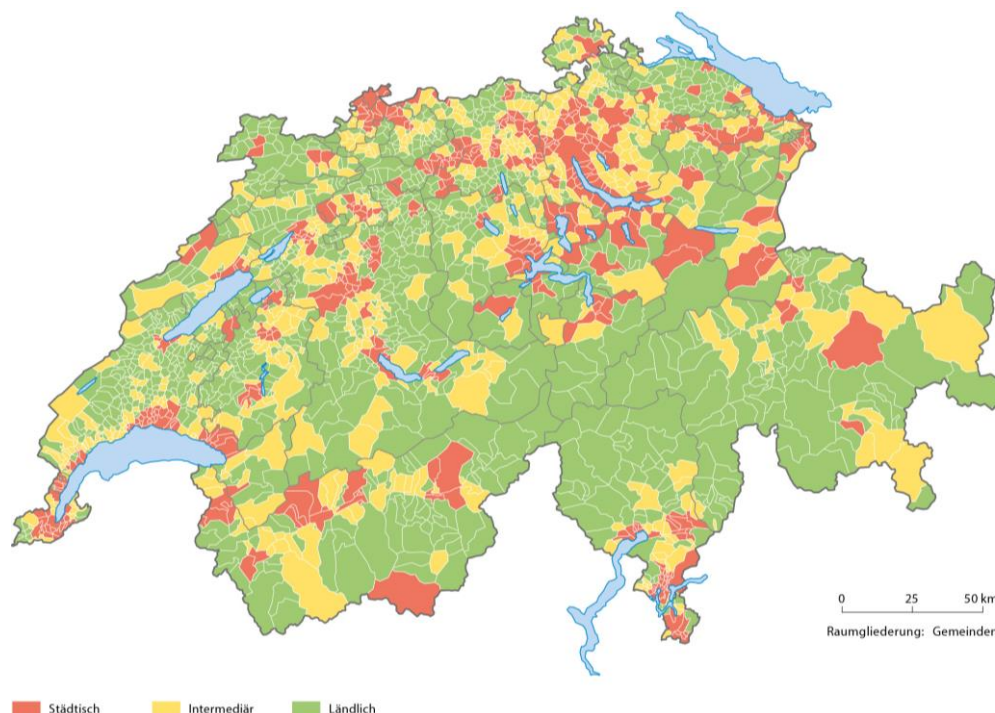


Abbildung 13: Kategorisierung der Schweizer Gemeinden nach städtisch (rot), intermediär (gelb) und ländlich (grün) (Bundesamt für Statistik BFS, 2017, S. 14)

Die Analyse der Resultate findet folglich an Hand der Bevölkerungssummen aller Locations jeder Kategorie statt. Damit wird keine konkrete Aussage einer einzelnen Gemeinde

gemacht, sondern die Tendenz aufgezeigt, welche Raumkategorie als Wohnstandort nachgefragt wird.

4.5 Technische Ausgangslage der Simulation

4.5.1 Statistik

Die Resultate beruhen auf folgendem statistischen Setting. Das Setting ist relevant für die Fehlerquote der Bevölkerungszahl pro Location.

Alle Resultate werden mit dem Basisszenario verglichen. Damit addieren sich die Fehlerquoten. Siehe auch Abschnitt 3.11.2 *Weisses Rauschen*.

Wiederholungen (engl. *Runs*): Basisszenario: 200

Szenarien und Subszenarien: 50

Fehlerquote:

200 Wiederholungen: +/- 3 Personen pro Location

50 Wiederholungen: +/- 13 Personen pro Location

Konfidenzintervall: 95%

Arithmetisches Mittel:

Basisszenario, Szenarien und Subszenarien beruhen jeweils auf dem arithmetischen Mittel der identischen Wiederholungen (engl. *Runs*).

4.5.2 Betrachtungszeitpunkt

Tabelle 7 zeigt das zeitliche Setting der Simulation.

Laufzeit Simulation:	1.1.2015 – 31.12.2024 (10 Jahre)
Betrachtungszeitpunkt Resultate:	31.12.2024

Tabelle 7: Zeitliches Setting der Simulation

Betrachtungszeitpunkt Inputdaten: Der Betrachtungszeitpunkt der Erreichbarkeitswerte aus Meyer (2017) unterscheidet sich vom Betrachtungszeitpunkt der vorliegenden Untersuchung. Die verwendeten Erreichbarkeitswerte aus Meyer (2017) beziehen sich auf das Jahr 2030 und basieren auf der Prognose für 2030 des Nationalen Personenverkehrsmodells (NPVM), Stand 2005. Die Prognosewerte des Nationalen Personenverkehrsmodells berücksichtigen das erwartete Bevölkerungswachstum und bereits bekannte Infrastrukturprojekte.

Die neueste synthetische Population von FaLC beruht auf den Daten von 2014. Es wäre technisch möglich, eine synthetische Population für das Jahr 2030 zu erzeugen. Die Population würde aber ebenfalls auf den zur Verfügung stehenden Statistiken des Bundesamtes für Statistik beruhen, welche derzeit für das Jahr 2016 verfügbar sind. Ferner

könnte sie nicht gemeindefein validiert werden. Siehe auch Abschnitt 3.10.2 *Validierung von in der Zukunft liegenden Resultaten*.

Daher wurden für die vorliegende Untersuchung, die Erreichbarkeitsgewinne, die auf 2030 beruhen, direkt ins Jahr 2015 eingefügt. Schliesslich werden die Gewinne als Faktoren implementiert und nicht absolut.

4.5.3 Ausgangslage zum Startzeitpunkt: Technischer Beschrieb

Synthetische Population:	Stand 1.1.2015, basierend auf Basispopulation 2014 (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, forthcoming 2017, S. 83)
Inputdateien Erreichbarkeitswerte:	S00: - S11: <i>autonome_fahrzeuge_s11.csv</i> S12: <i>autonome_fahrzeuge_s12.csv</i> S21: <i>autonome_fahrzeuge_s21.csv</i> S22: <i>autonome_fahrzeuge_s22.csv</i> S31: <i>autonome_fahrzeuge_s31.csv</i> S32, S32s, S32i, S32l: <i>autonome_fahrzeuge_s32.csv</i>
Skripts Autonome Fahrzeuge:	S11: <i>CalcVar_acc_AV_s11_MR.xml</i> S12: <i>CalcVar_acc_AV_s12_MR.xml</i> S21: <i>CalcVar_acc_AV_s21_MR.xml</i> S22: <i>CalcVar_acc_AV_s22_MR.xml</i> S31: <i>CalcVar_acc_AV_s31_MR.xml</i> S32: <i>CalcVar_acc_AV_s32_MR.xml</i>
Eingriff Bahnhöfe:	S00, S11, S12, S21, S22: <i>location_development__CH_v02.csv</i> S31, S32, S32s, S32i, S32l: <i>location_development__CH_v02_alleBahnhof.csv</i>
Eingriff Bauzonen:	S00, S11, S12, S21, S22, S31, S32: <i>landusage_building_zone_regulation__CH.csv</i> S32i: <i>landusage_building_zone_regulation__CH_AV_intermediaer_plus20.csv</i> S32l: <i>landusage_building_zone_regulation__CH_AV_laendlich_plus20.csv</i> S32s: <i>landusage_building_zone_regulation__CH_AV_staedtisch_plus20.csv</i>

Tabelle 8: Ausgangslage zum Startzeitpunkt der Simulation

Die komplette Modellkonfiguration ist auf Grund der kommerziellen Bestandteile von FaLC in einem separaten Dokument festgehalten und kann bei Interessensnachweis zur Verfügung gestellt werden. Anfragen bitte an die Autorin.

5. Resultate

Einen Überblick über die Resultate nach Szenario verschafft Abbildung 14. Für jedes Szenario ist die Veränderung der Bevölkerungsverteilung im Vergleich zum Basisszenario für die Kategorien städtisch, intermediär und ländlich dargestellt. Der Betrachtungszeitpunkt ist der 31.12.2024, zehn Jahre nach dem Startzeitpunkt der Simulation. Die Subszenarien sind in einer separaten Darstellung zusammengefasst.

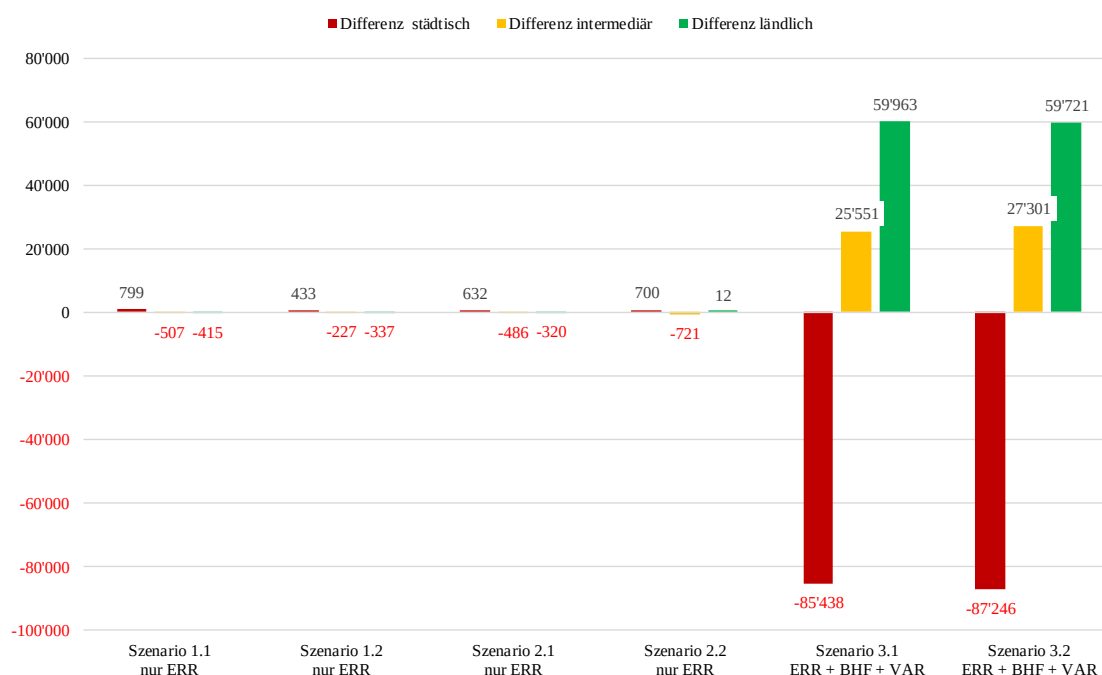


Abbildung 14: Veränderungen in Personen zum Basisszenario nach Szenario. Bevölkerungsstand: 31.12.2024

Abbildung 14 zeigt, dass die Veränderungen bei den Szenarien 1.1, 1.2, 2.1 und 2.2 gering sind. Bei den Varianten von Szenarien 3.1 und 3.2 werden Tendenzen sichtbar: Städtische Locations (rot) verlieren Bewohner, welche sich für einen Wohnstandort in intermediären (gelb) oder in ländlichen (grün) Locations entschieden. Dabei ist die Tendenz zu ländlichen Locations stärker als zu intermediären.

In den folgenden Abschnitten werden die Resultate der einzelnen Szenarien, beginnend mit dem Basisszenario, detaillierter beschrieben. Anschliessend folgt die Tabelle mit einer Zusammenstellung aller Resultate.

5.1 Resultate Szenarien

5.1.1 Basisszenario

Bevölkerungsverteilung Basisszenario	Personen	Prozent
Summe städtische Locations	5'460'271	61.13%
Summe intermediäre Locations	2'016'554	22.58%
Summe ländliche Locations	1'455'180	16.29%
Total Bevölkerung	8'932'006	100.00%

Tabelle 9: Basisszenario, Bevölkerungsverteilung am 31.12.2024

Tabelle 9 zeigt die Zusammensetzung der Schweizer Bevölkerung am 31.12.2014 des Basisszenarios. Die Bevölkerungsgrösse beträgt knapp 9 Millionen, davon wohnen gut 61% in städtischen, gut 22% in intermediären und ca. 16% in ländlichen Locations. Diese Werte dienen als Referenz für die Szenarien mit Eingriffen.

Die Fehlerquote liegt bei +/- 3 Personen pro Location (95% Konfidenzintervall).

5.1.2 Szenarien 1.1, 1.2, 2.1 und 2.2

Differenz zu Basisszenario	Szenario 1.1 nur ERR	Szenario 1.2 nur ERR	Szenario 2.1 nur ERR	Szenario 2.2 nur ERR
Differenz städtisch	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
Differenz intermediär	-0.03%	-0.01%	-0.02%	-0.04%
Differenz ländlich	-0.03%	-0.02%	-0.02%	0.00%
Differenz S (%)	799	433	632	700
Differenz I (%)	-507	-227	-486	-721
Differenz L (%)	-415	-337	-320	12

Tabelle 10: Szenarien 1.1, 1.2, 2.1 und 2.2: Differenz Bevölkerungsverteilung zum Basisszenario am 31.12.2024

Tabelle 10 zeigt die Resultate der Szenarien, die auf den Annahmen zu autonomen Fahrzeugen in Privatbesitz beruhen. Die Abweichungen beruhen ausschliesslich auf Erreichbarkeitsveränderungen (ERR), andere Eingriffe wurden bei diesen Szenarien nicht vorgenommen. Betrachtungszeitpunkt ist der 31.12.2024. Die Veränderungen sind gering.

Die Fehlerquote liegt +/- 16 Personen pro Location (95% Konfidenzintervall).

5.1.3 Szenarien 3.1 und 3.2

Differenz zu Basisszenario	Szenario 3.1 ERR + BHF + VAR	Szenario 3.2 ERR + BHF + VAR
Differenz städtisch	-85'438	-87'246
Differenz intermediär	25'551	27'301
Differenz ländlich	59'963	59'721
Differenz S (%)	-1.56%	-1.60%
Differenz I (%)	1.27%	1.35%
Differenz L (%)	4.12%	4.10%

Tabelle 11: Szenarien 3.1, 3.1 *nur Bahnhof* und 3.2: Differenz Bevölkerungsverteilung zum Basisszenario am 31.12.2024

Tabelle 11 zeigt die Resultate der Szenarien, die auf der Annahme einer autonomen, geteilten Flotte beruhen. Die Abweichungen setzen sich nebst veränderten Erreichbarkeitswerten (ERR) auch aus einem Bahnhof für jede Location (BHF) und aus der Anpassung der Bewertungsvariablen (VAR) zusammen.

Die Fehlerquote liegt bei +/- 16 Personen pro Location (95% Konfidenzintervall).

Bei Szenario 3.1 (ERR+BHF+VAR), das auf den konservativen Kapazitätserhöhungen basiert, entschieden sich über 85'000 Agenten gegen einen Wohnstandort in städtischen Locations und für einen Wohnstandort in einer intermediären Location (ca. 26'000 Personen) oder in einer ländlichen Location (ca. 60'000 Personen).

Die Resultate von Szenario 3.2 (ERR+BHF+VAR) sind für ländliche und städtische Locations etwas ausgeprägter, als jene von 3.1 (ERR+BHF+VAR). Die Auswirkungen auf die intermediären Gemeinden sind ähnlich stark. 87'000 Personen entscheiden sich gegen eine städtische Location und für einen Wohnstandort in einer intermediären (27'000 Personen) oder einer ländlichen Location (60'000 Personen). Die Differenz zu Szenario 3.1 geht nur auf die unterschiedlichen Erreichbarkeitsveränderungen zurück, die anderen Annahmen (BHF+VAR) waren identisch.

Die Resultate von Szenario 3.1 und 3.2 passen zu den Resultaten der Grundlagenuntersuchung von Meyer et al. (2016, S. 8). Dort zeigen sich im konservativen Szenario grosse Erreichbarkeitsverluste in den Agglomerationen, im hohen Szenario nicht. Zusätzlich liegen dort die Gewinne in der Peripherie deutlich höher. Abbildung 15 und Abbildung 16 bilden die Werteverteilung der verwendeten Erreichbarkeitsveränderungen ab.

Scenario 3
Conservative Capacity Increase

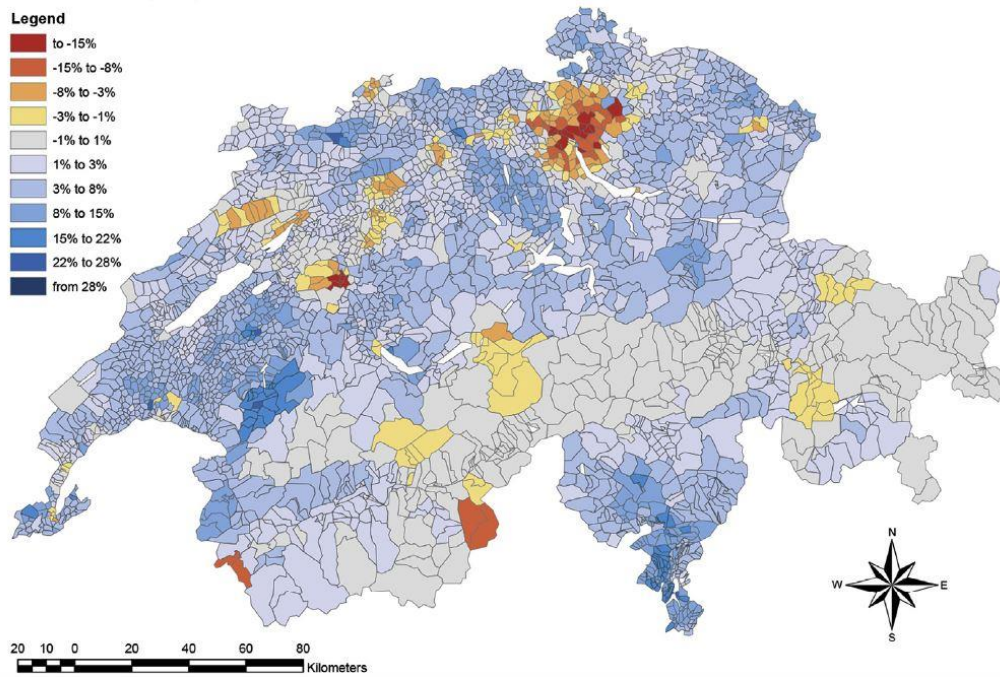


Abbildung 15: Konservatives Szenario, Erreichbarkeitsveränderungen, Meyer et al. (2017, S. 8)

Scenario 3
Optimistic Capacity Increase

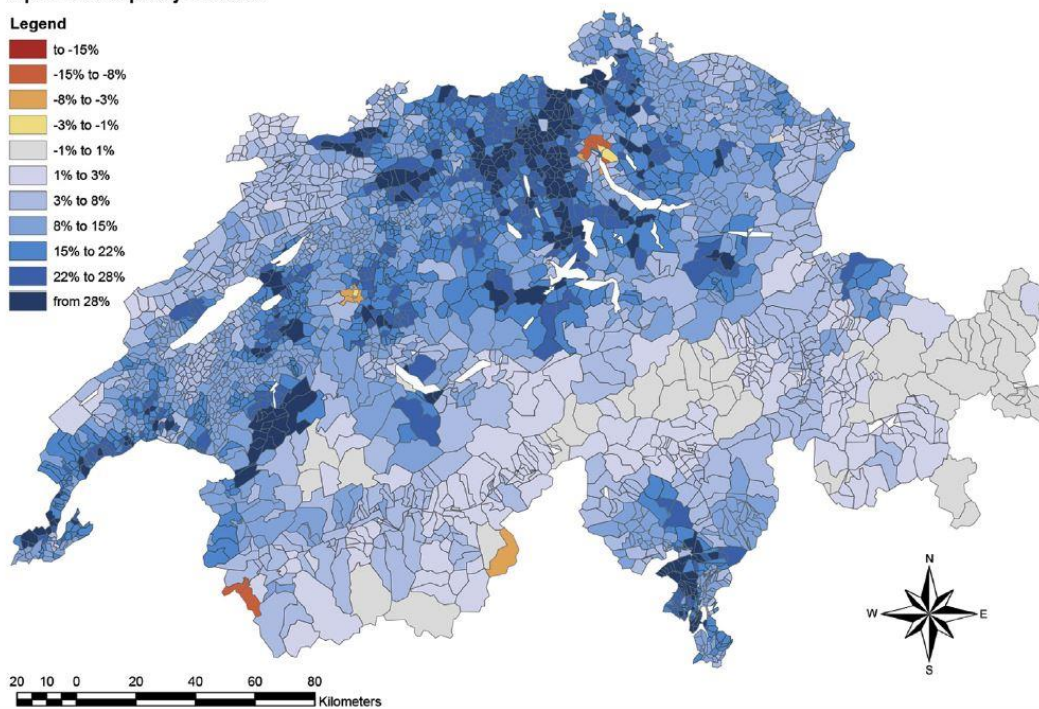


Abbildung 16: Hohes Szenario, Erreichbarkeitsveränderungen, Meyer et al. (2017, S. 8)

Folgende Tabellen bilden den Beitrag der Komponente VAR ab. Die Komponente ist Bestandteil der Szenarien 3.1 und 3.2 und korrigiert die Bewertung der Locations für die Erschliessung mit dem öffentlichen Verkehr mit den Werten mit dem motorisierten Individualverkehr. Diese ist in der Regel besser. Die gesamte Differenz der Betrachtung mit und ohne VAR beruht auf dem Malus für geringere Erschliessungsgüte mit dem öffentlichen Verkehr. Die unterschiedliche Erschliessungsgüte für MIV und ÖV ist in den Abbildungen in Abschnitt 2.3.7 *Erreichbarkeitstopographie der Schweiz für MIV und ÖV* dargestellt.

Szenario 3.1 mit und ohne Komponente VAR

Differenz zu Basisszenario	Szenario 3.1 ERR + BHF + VAR	Szenario 3.1 ERR + BHF	Differenz = Beitrag VAR
Differenz städtisch	-85'438	-54'368	31'071
Differenz intermediär	25'551	11'695	13'855
Differenz ländlich	59'963	42'487	17'475

Tabelle 12: Szenario 3.1: Beitrag Erschliessungsgüte ÖV

Szenario 3.2 mit und ohne Komponente VAR

Differenz zu Basisszenario	Szenario 3.2 ERR + BHF + VAR	Szenario 3.2 ERR + BHF	Differenz = Beitrag VAR
Differenz städtisch	-87'246	-54'587	32'659
Differenz intermediär	27'301	12'356	14'945
Differenz ländlich	59'721	42'246	17'475

Tabelle 13: Szenario 3.2: Beitrag Erschliessungsgüte ÖV

Das Vergleichsszenario 3.1 und 3.2 ohne Anpassung der Bewertungsvariable (ERR + BHF) zeigen bei allen Kategorien deutlich niedrigere Werte.

In Szenario 3.1 (Tabelle 12) ohne die Komponente zur Korrektur der Erschliessungsgüte entscheiden sich nur 54'000 Personen gegen einen städtischen Wohnort statt 85'000 Personen. In Szenario 3.2 (Tabelle 13) entscheiden sich nur 55'000 Personen gegen einen städtischen Wohnort statt 87'000. Das heisst, der Entscheid für oder gegen einen Wohnstandort ist massgeblich davon beeinflusst, wie gut die Erschliessung mit dem öffentlichen Verkehr ist.

Die summierte Fehlerquote liegt bei +/- 16 Personen pro Location (95% Konfidenzintervall).

5.1.4 Subszenarien 3.2l, 3.2i und 3.2s

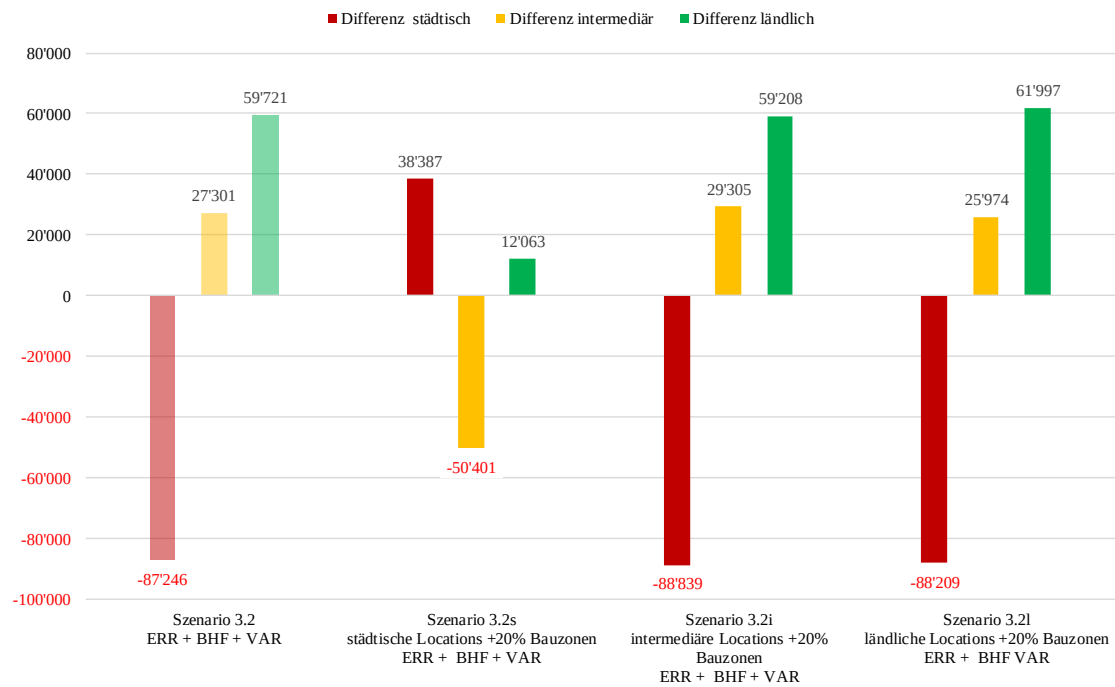


Abbildung 17: Szenario 3.2 (blasse Kolorierung) und Subszenarien 3.2s, 3.2i und 3.2l (kräftige Kolorierung), Bevölkerungsstand: 31.12.2024

Abbildung 17 stellt die drei Subszenarien und das zu Grunde liegende Szenario 3.2 nebeneinander. Die Differenzen beruhen einzig auf den Vergrößerungen um 20% je nach Kategorie der bestehenden Bauzonen für Wohnzwecke. In Subszenario 3.2s wurden die bestehenden Bauzonen von städtischen Gebieten künstlich um 20% erhöht, in Subszenario 3.2i jene von intermediären Gemeinden und in Subszenario 3.2l, jene von ländlichen Gemeinden.

Tabelle 14 zeigt die absoluten Differenzen der Subszenarien zum zugrundeliegenden Szenario 3.2 auf.

Differenz zu Szenario 3.2	Szenario 3.2 ERR + BHF + VAR	Szenario 3.2s städtische Locations +20% Bauzonen ERR + BHF + VAR	Szenario 3.2i intermediäre Locations +20% Bauzonen ERR + BHF + VAR	Szenario 3.2l ländliche Locations +20% Bauzonen ERR + BHF VAR
Differenz städtisch	5'373'026	125'633	-1'593	-964
Differenz intermediär	2'043'855	-77'702	2'004	-1'327
Differenz ländlich	1'514'901	-47'658	-513	2'276

Tabelle 14: Differenzen der Resultate der Subszenarien zu Szenario 3.2, Bevölkerungsstand: 31.12.2024

Die Unterschiede der Subsznarien fallen unterschiedlich deutlich aus. Die Auswirkung der Bauzonenvergrößerung um 20% in städtischen Gemeinden bewegt sich im fünf- bis sechsstelligen Bereich. Die Auswirkungen in intermediären und ländlichen Gemeinden nur im tiefen vierstelligen Bereich.

Dabei ist zu beachten, dass die verfügbaren Flächen pro Kategorie unterschiedlich gross sind. Siehe dazu 4.2.5 Subsznarien 3.2s, 3.2i, 3.2l.

Steht in städtischen Locations zwanzig Prozent mehr Bauland zur Verfügung, entscheiden sich 125'633 mehr Haushalte für einen städtischen Wohnstandort als im zugrundeliegenden Szenario 3.2. Steht in intermediären Locations zwanzig Prozent mehr Bauland zur Verfügung, entscheiden sich 2'004 mehr Haushalte für einen intermediären Wohnort. Steht in ländlichen Locations zwanzig Prozent mehr Bauland zur Verfügung, entscheiden sich 2'276 mehr Haushalte für einen ländlichen Wohnstandort.

Es wird ersichtlich, dass die Verfügbarkeit von Bauland in FaLC ein wirksames Mittel ist, die räumliche Siedlungsentwicklung zu steuern.

Auf der Folgeseite befindet sich die Tabelle 15 mit der Zusammenstellung aller Resultate.

Schweizer Bevölkerung Stand: 31.12.2024													
Basis- szenario	Szenario 1.1	Szenario 1.2	Szenario 2.1	Szenario 2.2	Szenario 3.1	Szenario 3.2	Szenario 3.2	Szenario 3.2	Szenario 3.1	Szenario 3.1	Szenario 3.1	Szenario 3.1	Szenario 3.1
	nur ERR	nur ERR	nur ERR	nur ERR	ERR + BHF + VAR	ERR + BHF + VAR	städtische Locations +20% Bauzonen ERR + BHF + VAR	intermediäre Locations +20% Bauzonen ERR + BHF + VAR	ländliche Locations +20% Bauzonen ERR + BHF + VAR	ohne VAR	ohne VAR	ohne VAR	ohne VAR
Summe städtische Locations	5'460'271	5'461'070	5'460'705	5'460'903	5'460'971	5'374'833	5'373'026	5'498'659	5'371'432	5'372'062	5'405'904	5'405'685	
Summe intermediäre Locations	2'016'554	2'016'048	2'016'327	2'016'068	2'015'833	2'042'105	2'043'855	1'966'154	2'045'859	2'042'529	2'028'250	2'028'910	
Summe ländliche Locations	1'455'180	1'454'765	1'454'843	1'454'861	1'455'193	1'515'143	1'514'901	1'467'243	1'514'388	1'517'177	1'497'668	1'497'426	
Total Bevölkerung	8'932'006	8'931'883	8'931'875	8'931'832	8'931'996	8'932'081	8'931'782	8'932'055	8'931'680	8'931'767	8'931'821	8'932'021	
Differenz zu Basisszenario	0	123	131	174	9	-75	223	-50	325	238	185	-15	
Prozentuale Verteilung auf die Kategorien													
Anteil städtisch (%)	61.13%	61.14%	61.14%	61.14%	61.14%	60.17%	60.15%	61.56%	60.14%	60.14%	60.52%	60.52%	
Anteil intermediär (%)	22.58%	22.57%	22.57%	22.57%	22.57%	22.86%	22.88%	22.01%	22.90%	22.87%	22.71%	22.72%	
Anteil ländlich (%)	16.29%	16.29%	16.29%	16.29%	16.29%	16.96%	16.96%	16.43%	16.95%	16.99%	16.77%	16.76%	
Kontrollsumme (%)	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	
Differenz zu Basisszenario nach Kategorie													
Differenz städtisch	0	799	433	632	700	-85'438	-87'246	38'387	-88'839	-88'209	-54'368	-54'587	
Differenz intermediär	0	-507	-227	-486	-721	25'551	27'301	-50'401	29'305	25'974	11'695	12'356	
Differenz ländlich	0	-415	-337	-320	12	59'963	59'721	12'063	59'208	61'997	42'487	42'246	
Differenz in Prozent zu Basisszenario nach Kategorie													
Differenz S (%)	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	-1.56%	-1.60%	0.70%	-1.63%	-1.62%	-1.00%	-1.00%	
Differenz I (%)	0.00%	-0.03%	-0.01%	-0.02%	-0.04%	1.27%	1.35%	-2.50%	1.45%	1.29%	0.58%	0.61%	
Differenz L (%)	0.00%	-0.03%	-0.02%	-0.02%	0.00%	4.12%	4.10%	0.83%	4.07%	4.26%	2.92%	2.90%	

Tabelle 15: Zusammenstellung aller Resultate, Bevölkerungsstand 31.12.2024

5.2 Diskussion

5.2.1 Methode

Voraussetzung der vorliegenden Untersuchung war die Möglichkeit, auf ein bestehendes integriertes Verkehrs- und Raumnutzungs-Simulationstool (FaLC) zurückgreifen zu können, das flexibel und modular aufgebaut ist, sodass alle technischen Möglichkeiten zur Integrierung der Inputdaten und zur Modifikation anderer Parameter gegeben sind. Voraussetzung war ferner, dass wissenschaftlich verwertbares Datenmaterial zu räumlichen Auswirkungen autonomer Fahrzeuge vorhanden war. Diese zwei Aspekte haben die vorliegende Untersuchung erst ermöglicht. Die Vorgehensweise, das Arbeiten in Szenarien, die Wahl der Variable und deren Einbringung in FaLC orientieren sich am wissenschaftlich und technisch Möglichen.

Da eine Simulation mit veränderten Erreichbarkeitswerten zuvor noch nicht getestet worden war, konnte im Voraus nicht abgeschätzt werden, wie gross die Ausschläge werden würden. Dies führte dazu, dass die Erreichbarkeitswerte (Komponente *ERR*) keinen deutlichen Beitrag zur Untersuchung leisteten. Die Modifikationen, welche eine veränderte Zusammenstellung der privaten und öffentlichen Verkehrskomponenten (*VAR*) und eine Umstrukturierung des öffentlichen Verkehrs (*BHF*) betrafen, zeigten jedoch deutliche Tendenzen. Wichtig ist zu bemerken, dass die hedonische Bewertung eines Standorts, so wie sie in FaLC implementiert ist, immer eine Kombination vieler Parameter und Gewichtungen ist. Die in FaLC bestehende Gewichtungsstruktur aller standortrelevanten Parameter mit der schwachen Gewichtung der Erreichbarkeit führt im Nachbilden der Realität zu sehr genauen Resultaten. Für die vorliegende Untersuchung war die Gewichtung der Komponente *ERR* in FaLC zu schwach. Auch die Einführung autonomer Fahrzeuge hat, wie bereits erwähnt, vielseitige Auswirkungen, die über mehr als nur eine Variable in das Modell integriert werden müssten. Gleichzeitig ist der Wissensstand hinsichtlich des Ausmasses vieler Effekte heute noch unklar.

5.2.2 Resultate

Effekte aus veränderten Erreichbarkeiten (Komponente *ERR*): Es zeigt sich, dass die Erreichbarkeitswerte alleine, das betrifft insbesondere die Resultate der Szenarien 1.1, 1.2, 2.1 und 2.2, zu wenig Gewicht in den Standortentscheiden der Agenten haben, um zur Beantwortung der Forschungsfrage einen eindeutigen Beitrag leisten zu können. Auch die Analyse in Anhang 3 zeigt, dass ein proportionaler Zusammenhang zwischen Erreichbarkeitsgewinnen und Bevölkerungsgewinnen nicht immer gegeben ist.

Die Ursache des geringen Effekts der Erreichbarkeitswirkungen wird in der geringen Gewichtung der Erreichbarkeit in der Nutzenfunktion vermutet. Zusätzlich abgeschwächt wurde der Effekt dadurch, dass die Erreichbarkeitswerte nur zu Beginn der Simulation verändert worden sind und für die Folgejahre konstant auf dem erstmalig veränderten Niveau belassen wurden. Zinseszinsseffekte wurden nicht berücksichtigt. D.h. der verstärkende Effekt, einer wachsenden oder schrumpfenden Bevölkerung auf die Erreichbarkeit einer Location wurde nicht abgebildet. Technisch ist die jährliche Anpassung der Erreichbarkeitswerte möglich, in vorliegendem Fall wurde aber zu Gunsten einer kürzeren Rechenzeit darauf verzichtet.

Ferner ist zu beachten, dass die Basis der Erreichbarkeitsveränderungen massgeblich auf Kapazitätserhöhungen beruht, wie in Abschnitt 4.1.1 *Grundlagen für Szenarien mit konservativer Kapazitätzunahme* und in Abschnitt 4.1.2 *Grundlagen für Szenarien mit hoher Kapazitätzunahme* beschrieben wurde. Die weiteren Auswirkungen, die diese Kapazitätserhöhungen in FaLC hätten, wurden aber nicht abgebildet. Insbesondere mögliche Effekte auf die Reisezeit haben Potential, wenn man sich vor Augen führt, dass die Kapazitätserhöhungen die Strassenkapazität beeinflusst und damit die Reisezeit verkürzen kann. Im Vergleich zur Erreichbarkeit wird die Reisezeit in der Nutzenfunktion von FaLC zehnmal höher gewichtet. Der Zusammenhang wurde in Abschnitt 2.3.3 *Auslastung des Verkehrsnetzes* erläutert.

Effekte der Komponenten Bahnhof (BHF) und Bewertungsvariablen (VAR): Bei den Szenarien 3.1, 3.2 und den Subszenarios von 3.2, werden die Tendenzen der räumlichen Verschiebung in der Wohnstandortwahl sichtbar. Die Effekte in Szenario 3.1 und 3.2 beruhen zum grösseren Teil auf den zugewiesenen Bahnhöfen (Komponente *BHF*) und zum einem kleineren Teil auf die veränderten Bewertungsvariablen des öffentlichen Verkehrs (Komponente *VAR*). Siehe dazu die Untersuchung der Szenarien 3.1. ohne *VAR* und 3.2 ohne *VAR* im Abschnitt 5.1.3 *Szenarien 3.1 und 3.2*. Die Differenz von Szenario 3.1 (*ERR+BHF+VAR*) und 3.2 (*ERR+BHF+VAR*) beruht jedoch einzig auf den unterschiedlichen Erreichbarkeitswerten zwischen der konservativen und der hohen Variante. Nicht separat untersucht wurde der Beitrag der Erreichbarkeitsvariablen (Komponente *ERR*) zu den Szenarien 3.1 und 3.2, da die Szenarien stets in Kombination mit der Komponente *VAR* und/oder *BHF* gerechnet wurden.

Effekte Bauzoneneingriffe: Die Effekte der Bauzoneneingriffe sind besonders deutlich bei der Vergrösserung der Bauzonen für Wohnzwecke bei städtischen Locations. Es ist

das einzige Szenario mit vollautonomer, geteilter Flotte, bei dem die städtischen Locations im Vergleich zum Basisszenario ohne Eingriffe einen Bevölkerungszuwachs im fünfstelligen Bereich verzeichnen. Der Eingriff überkompensiert den negativen Effekt der Flotte. Zieht man diesen negativen Effekt des Vergleichsszenarios S3.2 ab, resultiert gar ein fiktiver Überschuss im sechsstelligen Bereich, siehe Tabelle 16.

	Agenten
Überschuss Szenario 3.2s zu Basisszenario	38'387
Verlust Szenario 3.2 zu Basisszenario	87'246
Resultierender Überschuss Szenario 3.2s	125'633

Tabelle 16: Resultierender Überschuss Bauzonenvergrößerung städtischer Locations

Gemäss diesen Ergebnissen weichen entsprechend viele Agenten unter den gegebenen Umständen der bestehenden Bauzonenflächen von der optimalen Wohnstandortwahl ab und entscheiden sich für einen intermediären oder ländlichen Standort, weil die urbanen Flächen bereits verbraucht sind.

Auch in den weniger stark ausgeprägten Auswirkungen bei intermediären und ländlichen Locations entschieden sich jeweils mehr Agenten zu einer entsprechenden Wohnstandortwahl. Damit ist die Kausalität des Eingriffs aufgezeigt, jedoch ist der Druck auf die Flächen weniger gross. Auch unter den gegebenen Umständen finden fast alle Agenten, die einen intermediären oder ländlichen Standort suchen, ausreichend Fläche.

Beitrag der Resultate zur Beantwortung der Forschungsfrage:

Forschungsfrage: Haben autonome Fahrzeuge das Potential die Attraktivität peripherer Lagen als Wohnstandort zu erhöhen?

Die vorgenommenen Eingriffe, die einen Teil der möglichen räumlichen Auswirkungen autonomer Fahrzeuge abbilden, führen in der Summe zu einer höheren Attraktivität ländlicher und intermediärer Gemeinden. Die Resultate zeigen, dass sich mit den vorgenommenen Eingriffen mehr Agenten für einen Wohnstandort in einer ländlichen Location entscheiden, einige auch für einen in intermediären Gemeinden, die sowohl städtische als auch ländliche Merkmale aufweisen. Der Verlust geht ganz zu Lasten der städtischen Locations.

Über die Attraktivitätsveränderung einzelner Gemeinden wird keine Aussage gemacht, auch nicht darüber, ob die Gewinne besonders periphere Gemeinden stärker betreffen als weniger periphere Gemeinden.

Die Erreichbarkeitstopographie, wie sie in Abbildung 5 und Abbildung 6 (Darstellung der Schweiz mit Erhebungen an Orten mit hoher Erreichbarkeit) dargestellt ist, wird sich langfristig unter den getroffenen Annahmen verändern. In der vorliegenden Untersuchung wächst die Bevölkerung der städtischen Gebiete langsamer als im Basisszenario. Die Erreichbarkeit²² als Potential steigt damit auch weniger stark an. Ob es jedoch die Spitze (das Zentrum) trifft, ob oder angrenzende städtische Zonen, kann nach der vorliegenden Untersuchung nicht gesagt werden. Das Erreichbarkeitsniveau der dazwischenliegenden Räume, den ländlichen und intermediären Räumen, steigt im Gegenzug im Vergleich zum Basisszenario stärker an. Da eine autonome Taxiflotte unabhängig von einem Bahnhof oder einer Haltestelle ist, wird erwartet, dass sich die Erreichbarkeitstopographie gleichmässiger und weniger steil gestaltet.

Damit wird auch die Annahme gestützt, dass autonome Fahrzeuge zu mehr Sprawl führen, wie in Abschnitt 2.5.5 *Mehr Sprawl wegen autonomer Fahrzeuge* erläutert wurde.

Nichtsdestotrotz liegt der Beitrag der hier vorliegenden Resultate bei einer Umverteilung von maximal 89'000 Personen über 10 Jahre (Subszenario 3.2i). Das entspricht weniger als einem Prozent der Bevölkerung (prognostizierter Bevölkerungsstand am 31.12.2024).

5.2.3 Zeitlicher Rahmen und Alternative Betrachtungsweise

Der gewählte zeitliche Rahmen von 10 Jahren bildet einen Kompromiss ab von Rechenlaufzeit, zunehmender Prognoseunsicherheit und einem genügend langen Zeitraum, um Tendenzen aufzeigen zu können.

Eine Alternative zum Abbilden der Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge, die in der vorliegenden Untersuchung nicht gewählt wurde, ist die Gleichgewichtsmethode. Statt eine dynamische Population (mit Bevölkerungswachstum) über den Zeitraum von 10 Jahren zu betrachten, wird dabei eine statische Population (ohne Bevölkerungswachstum) hinsichtlich der Wohnstandortwahl beobachtet, bis sich eine Gleichgewichtssituation einstellt.

²² Eine Einflussgrösse auf die Erreichbarkeit ist die Bevölkerungszahl

6. Schlussbetrachtung

6.1 Zusammenfassung / Fazit

6.1.1 Forschungsstand

Die Literaturrecherche zeigte, dass die Entwicklung autonomer Fahrzeuge aktuell stark vorangetrieben wird. Das Phänomen ist längst keine Randerscheinung mehr. Wichtige öffentliche und private Entscheidungsträger/-innen beschäftigen sich mit den möglichen Auswirkungen, die Gesellschaft und Umwelt betreffen und schaffen die Voraussetzung für weitere Tests und Untersuchungen.

Die Recherche zeigt auch auf, dass es zu einzelnen Aspekten bereits fundierte Grundlagen gibt, viele Zusammenhänge aber noch nicht ausreichend quantifiziert werden können.

Der Fokus der Forschung zu autonomen Fahrzeugen liegt bisher stark auf autonomen Landfahrzeugen für den Personentransport. Andere Optionen werden weniger diskutiert. Beispielsweise ist das Potential von Drohnen für den Personentransport nebst der Forschung zu Fracht- oder militärischen Zwecken in der wissenschaftlichen Literatur wenig präsent.

Auf Grund der medialen Präsenz autonomer Fahrzeuge darf jedoch von weiterer und intensiver Forschungstätigkeit ausgegangen werden.

6.1.2 Simulation

Die Simulation zeigte, dass ein Zusammenhang zwischen den vorgenommenen Eingriffen zur Abbildung der räumlichen Auswirkungen autonomer Fahrzeuge und der Wohnstandortwahl der Agenten besteht. Dies betrifft die Resultate der Szenarien 3.1 und 3.2. Noch nicht untersucht wurde das Potential der Erreichbarkeitswirkungen auf die Verteilung der Arbeitsplätze, dies wäre in FaLC auch möglich.

Die Auswirkungen, der eingebrachten Erreichbarkeitsveränderungen (Komponente *ERR*) sind für sich nicht aussagekräftig genug (betrifft Szenario 1.1, 1.2, 2.1 und 2.2). Es bedarf weiterer technischer und konzeptueller Anpassungen, um den Beitrag der Erreichbarkeitsveränderungen an der Bevölkerungsverteilung abbilden zu können. Es ist vorgesehen, dies in einem anderen Rahmen weiter zu vertiefen.

Die Attraktivitätssteigerung der ländlichen Locations konnte im kleinräumlichen Massstab noch nicht aufgeschlüsselt werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass periphere Gemeinden stark profitieren werden. Damit können autonome Fahrzeuge einen Beitrag

zu Art. 1.2c des Bundesgesetzes über die Raumplanung (RPG) vom 22. Juni 1979, Stand 1. Januar 2016, SR 700, leisten.

«Sie [Bund, Kantone und Gemeinden, *Anm. d. Verf.*] unterstützen mit Massnahmen der Raumplanung insbesondere die Bestrebungen, das soziale, wirtschaftliche und kulturelle Leben *in den einzelnen Landesteilen zu fördern und auf eine angemessene Dezentralisation der Besiedlung* und der Wirtschaft hinzuwirken.»

6.2 Ausblick

6.2.1 Forschungsstand

Gerade, weil so viele Aspekte noch unklar sind, ist es wichtig, in der weiteren Forschung möglichst viele Auswirkungen autonomer Fahrzeuge zu untersuchen, um mit der voranschreitenden technischen Entwicklung Schritt zu halten. Dabei sind auch Schwerpunkte auch auf nachgeordnete Auswirkungen zu legen, welche nicht in erster Linie direkt die Digitalisierung und die künstliche Intelligenz betreffen, sondern bestehende Strukturen und unsere Kultur.

6.2.2 Politische Dimension

Die Effekte autonomer Fahrzeuge wirken über administrative und fachliche Grenzen hinweg und bedürfen einer übergeordneten Betrachtungsweise.

Die Auswirkungen autonomer Fahrzeuge betreffen alle und es erscheint wichtig, frühzeitig fundierte Grundlagen für die politische Diskussion bereitzustellen.

Das Prinzip der Subsidiarität (Art. 5a der Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft (BV) vom 18.4.1999, Stand 12.2.2017, SR101), das die Schweiz und die Schweizer Raumplanung prägt, wird die Diskussion und die Gestaltung der Integrierung autonomer Fahrzeuge prägen und darf nicht ausser Acht gelassen werden.

6.2.3 Vertiefung der gewonnenen Erkenntnisse

Die gewonnenen Erkenntnisse gehören zur Kategorie „erste Resultate“ und bedürfen in einem nächsten Schritt weiteren Vertiefungen. Mit steigendem Erkenntnisstand kann schliesslich begonnen werden, erste Handlungsempfehlungen abzuleiten. Auch diese müssen anschliessend wieder getestet werden. Die Autorin sieht vor, den Erkenntnisstand in einem anderen Rahmen weiter voranzubringen.

Literaturverzeichnis

Axhausen, K. W. (12. 09 2014). *Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten SVI*. Von Welches Geschwindigkeitsniveau braucht eine Stadt?:

http://www.svi.ch/fileadmin/geschwindigkeiten/SVI_Axhausen_141209.pdf
abgerufen

Axhausen, K. W., Fröhlich, P., Tschopp, M., & Keller, P. (2003). *Erreichbarkeitsveränderungen in der Schweiz und ihre Wechselwirkungen mit der Bevölkerungsveränderung 1950-2000*. Zürich: ETH Zürich Research Collection. Von <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004663285> abgerufen

Axhausen, K. W., Fröhlich, P., Tschopp, M., & Keller, P. (2003). *Erreichbarkeitsveränderungen in der Schweiz und ihre Wechselwirkungen mit der Bevölkerungsveränderung 1950-2000, Arbeitsbericht Verkehrs- und Raumplanung 189*. ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme. Bern: Autor.

Becker, F., Bösch, P., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2016). *Entwicklung konsistenter Szenariern für die Einführung autonomer Fahrzeuge. Arbeitsbericht*. Zürich: ETH Zürich. Von <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/119978> abgerufen

Ben Akiva, M. E., & Lerman, S. R. (1997). *Discrete choice analysis : theory and application to travel demand*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Bodenmann, B. (2017). Abbildung Weisses Rauschen in FaLC. St. Gallen.

Bodenmann, B. B., Bode, J., Sanchez, B., & Zeiler, A. (2015). *An Integrated Land Use Model for Switzerland. Detailed Description of the FaLC Template 2015. FaLC Working Paper 03*. Zürich und Herisau: IVT, ETH Zürich und regioConcept AG.

Bodenmann, B.B. & P. Bürki. (2016). *FaLC - Workshop*. St. Gallen: Autor.

Bösch, P., Becker, F., Becker, H., & Axhausen, K. W. (2017). *Cost-based Analysis of Autonomous Mobility Services*. ETH Zurich, Institute for Transport Planning and Systems (IVT). Zürich: ETH Zürich.

- Brooks, R. (12. 01 2017). *Blog: Robots, AI, and other stuff. Post: Unexpected Consequences of Self Driving Cars*. Von <https://rodneybrooks.com/unexpected-consequences-of-self-driving-cars/> abgerufen
- Brustein, J. (14. 07 2014). *Self-Driving Cars Will Mean More Traffic*. Von <https://www.bloomberg.com/businessweek:https://s3.amazonaws.com/media.atssa.com/Social+Media/0001BloombergBusinessweek.pdf> abgerufen
- Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2010a). *Erschliessung und Erreichbarkeit in der Schweiz mit dem öffentlichen Verkehr und mit dem motorisierten Individualverkehr. Grundlagenbericht*. Ittigen: Autor.
- Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2010b). *Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK, Referenzzustand 2030*. Bern: Autor. Von <https://www.are.admin.ch/are/de/home/medien-und-publikationen/publikationen/verkehr/nationales-personenverkehrsmodell-des-uvek-referenzzustand-2030.html> abgerufen
- Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2012a). *Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK (NPVM). Fahr- und Verkehrsleistungen des motorisierten Individualverkehrs 2005/2008: Methodenbericht und räumliche Auswertungen*. Bern: Autor.
- Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (15. 06 2012b). *Raumplanungsgesetz RPG: Vernehmlassung Änderungen vom 15. Juni 2012*. Abgerufen am 26. 05 2017 von <https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/recht/raumplanungsgesetzrpgaenderungvom15juni2012.pdf.download.pdf/raumplanungsgesetzrpgaenderungvom15juni2012.pdf>
- Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2013). *Bauzonenstatistik Schweiz 2012 - Statistik und Analysen*. Ittigen: Autor. Von <https://www.are.admin.ch/are/de/home/raumentwicklung-und-raumplanung/grundlagen-und-daten/bauzonenstatistik-schweiz.html> abgerufen
- Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (02. 04 2014a). *Bundesamt für Raumentwicklung*. Von <https://www.are.admin.ch/are/de/home/raumentwicklung-und->

raumplanung/raumplanungsrecht/revision-des-raumplanungsgesetzes--rpg-
/rpg1.html abgerufen

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2014b). *Entwicklung eines Flächennutzungsmodells für die Schweiz. Schlussbericht*. Bern: Autor.

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2014c). *Erläuternder Bericht zur Teilrevision vom 2. April 2014 der Raumplanungsverordnung*. Bern: Autor. Abgerufen am 26. 05 2017 von <https://www.are.admin.ch/are/de/home/raumentwicklung-und-raumplanung/raumplanungsrecht/revision-des-raumplanungsgesetzes--rpg-/rpg1.html>

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (02. 08 2017). *Agglomerationsprogramme Verkehr und Siedlung*. Von <https://www.are.admin.ch/are/de/home/verkehr-und-infrastruktur/programme-und-projekte/agglomerationsprogramme-verkehr-und-siedlung.html> abgerufen

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2017 forthcoming). *Weiterentwicklung Flächennutzungsmodellierung: Wohnstandortwahl, Erweiterung des Modells FaLC: Verhaltensmodelle und synthetische Population*. Bern: UVEK.

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2017a). *NPVM 2016: Zonenstruktur und Verkehrsnetze. Schlussbericht*. Bern: Autor.

Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2017b). *Raumplanungsgesetz RPG: Entwurf Vernehmlassung 2017*. Bern: Autor. Von <https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/recht/dokumente/bericht/raumplanungsgesetz-rpg-vernehmlassung-2017-lesehilfe.pdf.download.pdf/RPG%20mit%20vorgesehenen%20%C3%84nderungen.pdf> abgerufen

Bundesamt für Statistik BFS. (2015). *Pendlermobilität in der Schweiz 2014*. Neuchâtel: Autor. Von <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr/pendlermobilitaet.assetdetail.350448.html> abgerufen

Bundesamt für Statistik BFS. (2016). *Kosten und Finanzierung des Verkehrs, Strassen und Schiene 2013*. Neuchâtel: Autor. Von <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/kosten-finanzierung.assetdetail.1023800.html> abgerufen

Bundesamt für Statistik BFS. (2016). *Verkehrsunfälle in der Schweiz 2015*. Neuchâtel: Bundesamt für Statistik BFS.

Bundesamt für Statistik BFS. (2017). *Die Raumgliederungen der Schweiz 2017 - MS-Excel Version*. Neuchâtel: Autor. Von <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/publikationen.assetdetail.2546562.html> abgerufen

Bundesamt für Statistik BFS. (2017). *Gemeindetypologie und Stadt/Land-Typologie 2012*. Neuchâtel: Autor.

Bundesamt für Strassen ASTRA. (21. 12 2016a). *Automatisierung und Digitalisierung werden Verkehr markant verändern. Medienmitteilung 21.12.2016*. Von <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-65042.html> abgerufen

Bundesamt für Strassen ASTRA. (2016b). *Automatisiertes Fahren - Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen*. Bern: Autor.

Bundesamt für Verkehr BAV. (27. 07 2017). *Regionaler Personenverkehr (RPV) mit Erschliessungsfunktion*. Von <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/das-bav/aufgaben-des-amtes/finanzierung/finanzierung-verkehr/personenverkehr/rpv-mit-erschliessungsfunktion/rpv-kennzahlen.html> abgerufen

Cervero, R., & Hansen, M. (September 2002). Induced Travel Demand and Induced Road Investment. A Simultaneous Equation Analysis. *Journal of Transport Economics and Policy, Volume 36, Part 3*, S. 469-490.

Credit Suisse. (März 2014). *Debatte Verkehr und Mobilität: Zürich und Genf hilft wohl nur "Road Pricing"*. *Swiss Issues Konkunktur März 2014*, S. 12-13.

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK. (2013). *Faktenblatt Bauzonen zur Revision des Raumplanungsgesetzes*. Bern: Generalsekretariat GS-UVEK. Von <https://www.uvek.admin.ch/dam/uvek/de/dokumente/raumentwicklung/bauzone-n.pdf.download.pdf/bauzonen.pdf> abgerufen

- Fagant, D., & Kockelmann, K. (July 2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research part A: Policy and Practice* Volume 77, S. 167-181.
- Fotheringham, A. S. (2000). *Quantitative geography: Perspectives on spatial data analysis*. London: Sage.
- Friedrich, B. (2015). Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge. In J. G. M. Maurer, *Autonomes fahren* (S. 331-250). Berlin: Springer-Verlag. doi:http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-45854-9_16
- Fröhlich, P. (2008). *Änderungen der Intensitäten im Arbeitspendlerverkehr von 1970 bis 2000 (Dissertation)*. Zürich: ETH Zürich.
- Geurs, K. (2006). *Accessibility, Land Use and Transport, Dissertation*. Delft: Eburon.
- Glaeser, E. L., & Kahn, M. (2004). Chapter 56: Sprawl and Urban Growth. In V. J. Henderson, & J.-F. Thisse, *Handbook of Regional and Urban Economics, Volume 4, Cities and Geography* (S. 2481-2527). Amsterdam.Boston.Heidelberg.London.New York.Oxford.Paris.San Diego.San Francisco.Singapore.Sidney.Tokyo: Elsevier North Holland.
- Griffel, A. (2014). *Raumplanungs- und Baurecht in a nutshell* (2 Ausg.). Zürich / St. Gallen: Dike Verlag AG.
- Hansen, W. (Volume 25. Issue 2 1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of Planners (JAPA)*, S. 73-76.
- Hörl, S., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2016). *Recent perspectives on the impact of autonomous vehicles, Working paper 10XX*. Institute for Transport Planning and Systems. Zürich: ETH Zürich.
- Hughes, J. W., & Seneca, J. J. (September 2014). The Receding Metropolitan Perimeter. A new postsuburban demographic normal? (R. E. Policy, Hrsg.) *Rutgers Regional Report. Issue Paper Number 37*.
- Jaeger, J., Schwick, C., Bertiller, R., & Kienast, F. (2008). *Landschaftszersiedelung Schweiz - Quantitative Analyse 1935 bis 2002 und Folgerungen für die Raumplanung. Wissenschaftlicher Abschlussbericht. Schweizerischer Nationalfonds, NFP 54. Nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung*.

- Zürich: Schweizerischer Nationalfonds. Von http://www.nfp54.ch/files/nxt_projects_86/21_07_2011_08_26_49-NFP54ZERSIEDELUNG_LandschaftszersiedelungSchweiz-QuantitativeAnalyse1935bis2002.pdf abgerufen
- KMPG Australia, Foxlee, P., Low, P., Thakur, P., & Grace, R. (2016). *No U-turn. How autonomous vehicles will reshape our cities*. Autor.
- Kockelmann, K., Bansal, P., Boyles, S. D., Bujanovic, P., Choudhary, T., Clements, L., . . . Fagnant, D. (2016). *Implications of Connected and Automated Vehicles on the Safety and Operations of Roadway Networks: A Final Report*. The University of Texas at Austin, Center for Transportation Research. Austin, Texas: Autor.
- Litmann, T. A. (2017). *Autonomous Vehicle Implementations Predictions, Implications for Transport Planning*. Victoria Transport Policy Institute. Victoria, Canada: Autor.
- Meyer, J., Becker, H., Bösch, P. M., & Axhausen, K. W. (15. 04 2017). Autonomous Vehicles: The next jump in accessibilities? *Research in Transportation Economics*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2017.03.005>
- Meyer, J., Bösch, P., Becker, H., & Axhausen, K. W. (2016). *Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge, Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung, 1220*. Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme. Zürich: ETH Zürich.
- Moser, P. (2007). Pendelstrukturen im Grossraum Zürich: Entwicklungen und Perspektiven. *Information zur Raumentwicklung Heft 2/3.2007*, S. 131-139.
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). (2013). *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*. WASHINGTON, DC: Autor. Von http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf abgerufen
- Regierungsrat des Kantons Zürich. (2016). Auszug aus dem Protokoll des Regierungsrates des Kantons Zürich, Sitzung vom 5. Januar 2016. KR-Nr. 301/2015. Zürich: Autor.
- Rodoulis, S. (2014). The Impact of Autonomous Vehicles on Cities. In G. Sun, E. Gwee, L. S. Chin, & A. Low, *Journeys. Sharing Urban Transport Solutions. Issue 12*.

Singapore: LTA Academy. Land Transport Authority. Von www.lta.gov.sg/ltaacademy abgerufen

Rudolf Keller & Partner Verkehrsingenieure für Bundesamt für Strassen ASTRA. (2002). *Verfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit, der Verkehrsqualität und der Belastbarkeit von Verkehrsanlagen*. MuttENZ: Autor.

SAE International. (2014). *AUTOMATED DRIVING LEVELS OF DRIVING AUTOMATION ARE DEFINED IN NEW SAE INTERNATIONAL STANDARD J3016*. Global Ground Vehicle Standards: Autor. Von http://www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf abgerufen

Schirmer, D., & Matter, D. (2016). *Weiterentwicklung Flächennutzungsmodellierung: Wohn- und Unternehmensstandortwahl Konzeptbericht AP1*. Zürich: Farländer Partner AG Raumentwicklung.

Schweiz am Sonntag. (31. 01 2016). *Aargauer Zeitung*. Abgerufen am 04. 08 2017 von Das grosse Geheimnis um die Kosten von Bus und Bahn: <https://www.aargauerzeitung.ch/aargau/kanton-aargau/das-grosse-geheimnis-um-die-kosten-von-bus-und-bahn-130028849>

SRG Idée Suisse. (26. 05 2017). Von Eine multimediale Chronik der Schweiz: <http://www.ideesuisse.ch/315.0.html> abgerufen

Stadt Zürich. (2012/1). *Mobilität in Zahlen, Befragungen*. Zürich: Autor.

Stadt Zürich. (2013). *Mobilität in Zahlen 2012/3, Verkehrszählungen*. Zürich: Autor. Von https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/taz/publikationen_u_broschueren/mobilitaet_in_zahlen_2012_3.html abgerufen

Stadt Zürich. (2015). *Taxitarif der Stadt Zürich*. Zürich: Autor.

Statistisches Amt Kanton Zürich. (2017). *Der Preis des Bodens. Ein hedonisches Modell der Wohnbaulandpreise im Kanton Zürich*. Zürich: Autor. Von http://www.statistik.zh.ch/dam/justiz_innern/statistik/Publikationen/statistik_info/si_2017_05_hedonisches_Bodenpreismodell.pdf abgerufen

- Stock, W., & Bernecker, T. (2014). *Verkehrsökonomie. Eine volkswirtschaftlich-empirische Einführung in die Verkehrswissenschaft. 2. Auflage.* Wiesbaden: Springer Gabler.
- TCS. (27. 07 2017). *www.tcs.ch*. Von <https://www.tcs.ch/de/auto-zweirad/auto-kaufen-verkaufen/auto-unterhaltskosten/kosten-eines-musterautos.php?viewmode=print> abgerufen
- Tientrakool, P., Ho, Y.-C., & Maxemchuk, N. (2011). Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance. *IEEE Vehicular Technology Conference*, (S. 5). doi:<http://dx.doi.org/10.1109/vetecf.2011.6093130>
- Tschopp, M. (2007). Verkehrsinfrastruktur und räumliche Entwicklung in der Schweiz 1950 - 2000. Dissertation, ETH Zürich.
- UBER. (27. 07 2017). *Uber Zürich*. Von <https://www.uber.com/de-CH/fare-estimate/> abgerufen
- VSS Vereinigung Schweizer Strassenfachleute. (2000). Schweizer Norm SN 640 023 Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit. VSS Zürich.
- Weis, C., & Axhausen, K. W. (2012). *Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs*. Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen.
- WIRED; Zambelich, Ariel;. (15. 10 2014). *Whoops: The Self-Driving Tesla May Make Us Love Urban Sprawls Again*. Abgerufen am 21. 07 2017 von <https://www.wired.com/2014/10/tesla-self-driving-car-sprawl/>

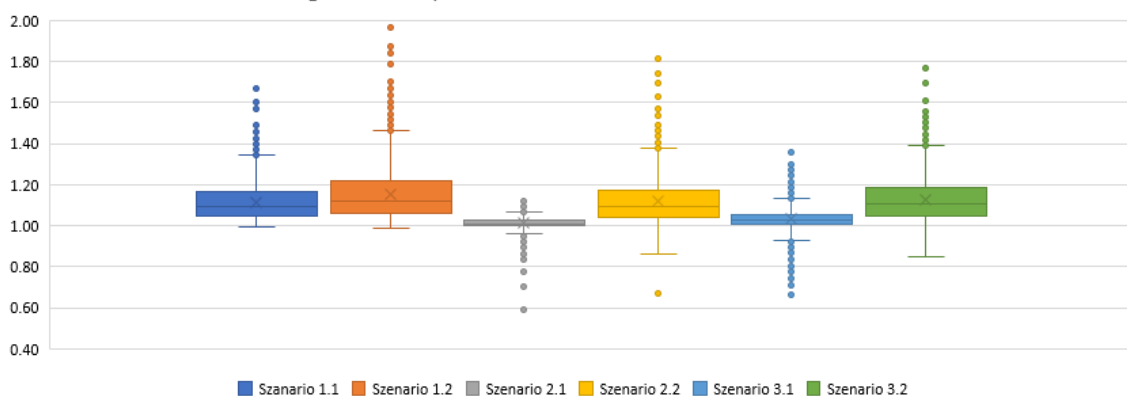
Anhang Nr. 1: Analyse der Multiplikatoren der für die Erreichbarkeitswerte in FaLC

Die folgende Darstellung zeigt die Streuung der ermittelten Multiplikatoren aller Locations für jedes Szenario als Box-Plot-Diagramm basierend auf Meyer (2017).

Die Szenarien 1.1 (blau) und 1.2 (orange) verzeichnen ausschliesslich Erreichbarkeitsgewinne, wobei Szenario 1.2 generell etwas höhere Gewinne verzeichnet als Szenario 1.1. Szenario 1.2 ist das Szenario mit den höheren Kapazitätssteigerungen.

Szenario 2.1 (grau), konservative Kapazitätserhöhung, autonomes Fahren auf allen Strassen und Fahrzeuge in Privatbesitz verzeichnet einige Locations mit Erreichbarkeitsverlusten und keine hohen Gewinne. Szenario 2.2. (gelb), hohe Kapazitätssteigerung erreicht beinahe die Gewinne von Szenario 1.2 (orange).

Szenario 3.1 (hellblau) verzeichnet ein fast ausgeglichenes Gewinn-/ Verlustverhältnis. Szenario 3.2 (grün) zeigt leicht mehr und stärkere Verluste als die anderen Szenarien mit hoher Kapazitätssteigerung.



Multiplikatoren Erreichbarkeitswerte aller Locations nach Szenario

Die Mittelwerte der Multiplikatoren sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

	Szenario 1.1	Szenario 1.2	Szenario 2.1	Szenario 2.2	Szenario 3.1	Szenario 3.2
Arith. Mittel	1.12	1.15	1.01	1.12	1.04	1.13
Median	1.10	1.12	1.01	1.09	1.03	1.11
Arith. Mittel städtisch	1.12	1.16	1.00	1.11	1.02	1.12
Median städtisch	1.10	1.13	1.00	1.08	1.02	1.11
Arith. Mittel intermediär	1.14	1.19	1.02	1.15	1.04	1.16
Median intermediär	1.13	1.17	1.02	1.13	1.03	1.14
Arith. Mittel ländlich	1.10	1.13	1.02	1.11	1.04	1.12
Median ländlich	1.08	1.10	1.01	1.08	1.03	1.09

Tabelle: Mittelwerte der Erreichbarkeitsmultiplikatoren pro Szenario

Folgende Darstellung vergleicht die verschiedenen Mittelwerte je nach Szenario. Szenario 1.2 (orange) weist überall die höchsten Mittelwerte auf, d.h. die grössten Erreichbarkeitsgewinne. Am wenigsten verändern sich die mittleren Erreichbarkeitswerte in Szenario 2.1.

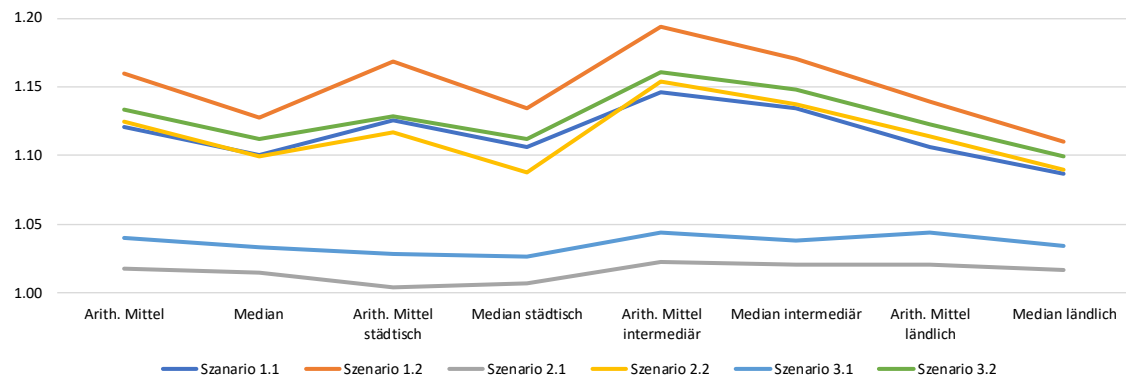


Abbildung: Vergleich der Mittelwerte der Szenarien

Anhang Nr. 2: Skript autonome Fahrzeuge

```

1  <?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
2  <falccconfig>
3    <outputs>
4      <output years="" active="true"
5        name="factorsAccessability" path="factorsAccessability"
6        variables="locationid;municipalityid;cantonid;ACC_AV_MIV_RES;ACC_AV_MIV_WOR;ACC_AV_PT_RES;ACC_AV_PT_WOR;av_1;av_2;av_3;av_4"
7        header="locationid;municipalityid;cantonid;ACC_AV_MIV_RES;ACC_AV_MIV_WOR;ACC_AV_PT_RES;ACC_AV_PT_WOR;av_1;av_2;av_3;av_4" info="Kontrolle Erreichbarkeiten" />
8    </outputs>
9    <!-- Input File with Factors-->
10   <arrays>
11     <array name="factorsAcc" type="columnname" match="e"
12       file="assumptions/autonome_fahrzeuge_s□□"/>
13   </arrays>
14   <variables>
15     <variable name="ACC_AV_MIV_RES" value="0"/> <!-- car residents -->
16     <variable name="ACC_AV_MIV_WOR" value="0"/> <!-- car work -->
17     <variable name="ACC_AV_PT_RES" value="0"/> <!-- pt residents -->
18     <variable name="ACC_AV_PT_WOR" value="0"/> <!-- pt work -->
19   </variables>
20   <loop id="loc1" level="location" filter="year=2015">
21     <setvalue name="formula" variable="ACC_AV_MIV_RES" >
22       <formula new_value="av_1"/>
23     </setvalue>
24     <setvalue name="formula" variable="ACC_AV_MIV_WOR" >
25       <formula new_value="av_2"/>
26     </setvalue>
27     <setvalue name="formula" variable="ACC_AV_PT_RES" >
28       <formula new_value="av_3"/>
29     </setvalue>
30     <setvalue name="formula" variable="ACC_AV_PT_WOR" >
31       <formula new_value="av_4"/>
32     </setvalue>
33     <setvalue name="formula" variable="av_1" >
34       <array array="factorsAcc" Ycoord="s□□" Xcoord="locationid"
35       new_value="array_value * ACC_AV_MIV_RES"/>
36     </setvalue>
37     <setvalue name="formula" variable="av_2" >
38       <array array="factorsAcc" Ycoord="s□□" Xcoord="locationid"
39       new_value="array_value * ACC_AV_MIV_WOR"/>
40     </setvalue>
41     <!-- activate only for scenarios 31 and 32 -->
42     <setvalue name="formula" variable="av_3" >
43       <formula new_value="av_1"/>
44     </setvalue>
45     <setvalue name="formula" variable="av_4" >
46       <formula new_value="av_2"/>
47     </setvalue>
48     <!-- <export name="factorsAccessability" truncate="true" /> -->
49   </loop>
50   <loop id="loc1" level="location" filter="year!=9999">
51     <export name="factorsAccessability" truncate="true" />
52   </loop>
53 </falccconfig>

```

Anhang Nr. 3: Verhältnis Erreichbarkeitsveränderung zu Veränderung Personenzahl

Szenarien 1.1, 1.2, 2.1 und 2.2

Die Veränderungen beruhen einzig auf dem Erreichbarkeitsmultiplikator.

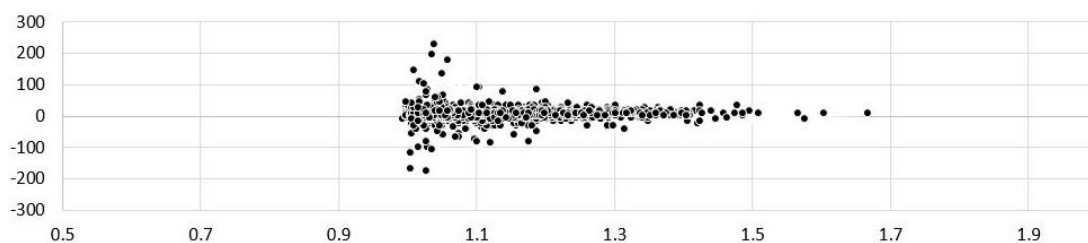


Abbildung: Szenario 1.1, Verhältnis Bevölkerungsveränderung (y) zu Erreichbarkeitsmultiplikator (x)

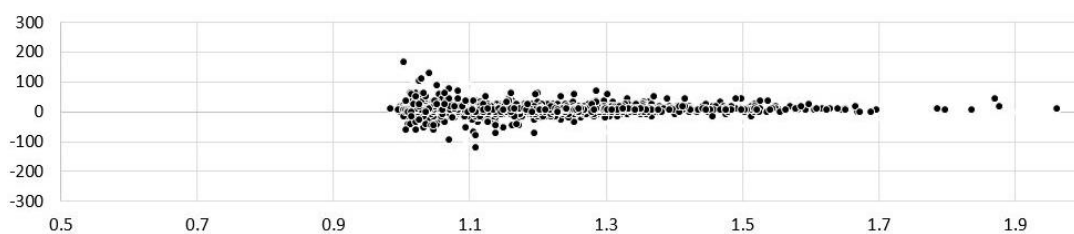


Abbildung: Szenario 1.2, Verhältnis Bevölkerungsveränderung (y) zu Erreichbarkeitsmultiplikator (x)

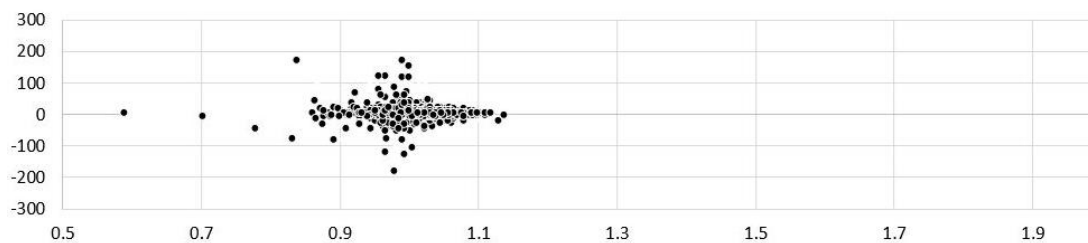


Abbildung: Szenario 2.1, Verhältnis Bevölkerungsveränderung (y) zu Erreichbarkeitsmultiplikator (x)

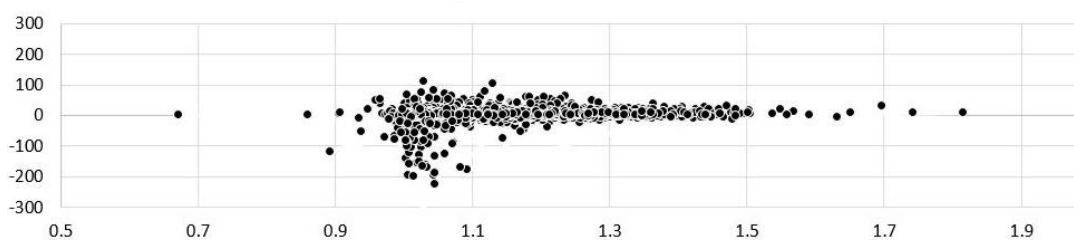


Abbildung: Szenario 2.2, Verhältnis Bevölkerungsveränderung (y) zu Erreichbarkeitsmultiplikator (x)

Szenarien 3.1 und 3.2:

Die Bevölkerungsveränderungen von Szenario 3.1 und 3.2 beruhen auf weiteren Eingriffen, als nur auf den Erreichbarkeitsmultiplikator.

Die Skala (y) unterscheidet sich von den vorherigen Darstellungen.

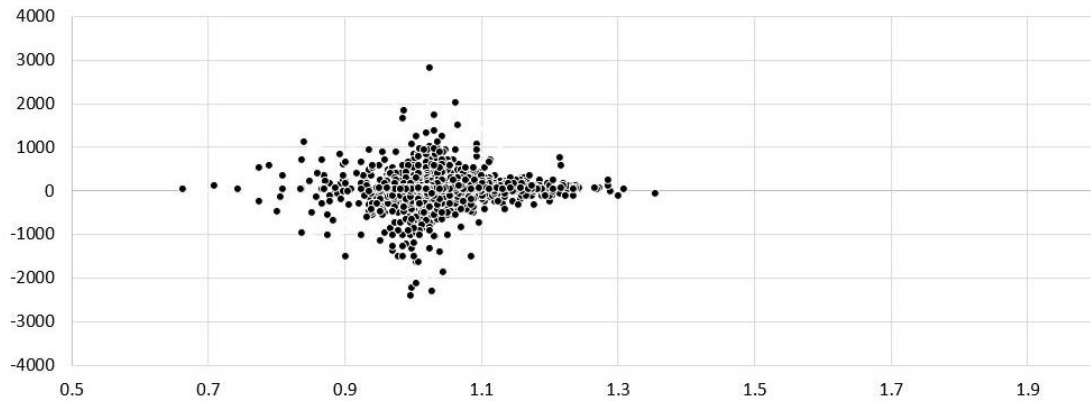


Abbildung: Szenario 3.1, Verhältnis Bevölkerungsveränderung (y) zu Erreichbarkeitsmultiplikator (x)

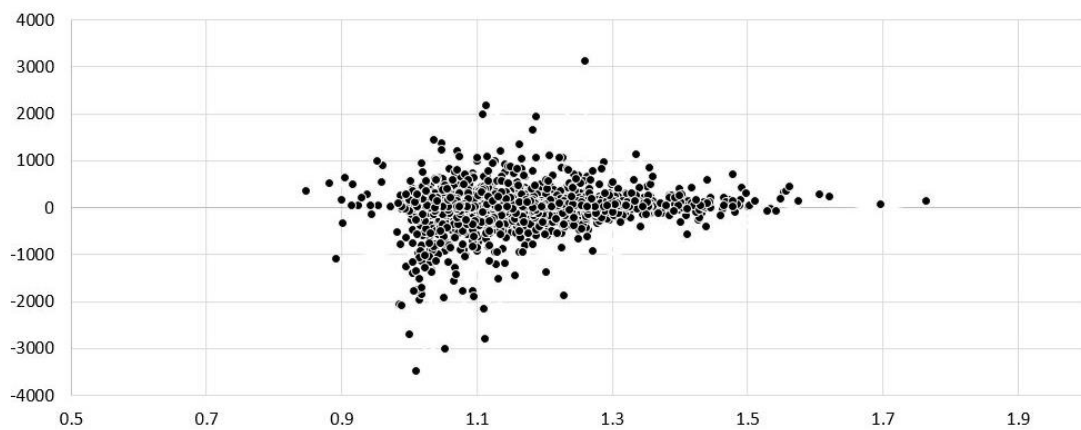


Abbildung: Szenario 3.2, Verhältnis Bevölkerungsveränderung (y) zu Erreichbarkeitsmultiplikator (x)

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Thema „Der Einfluss der Erreichbarkeitswirkungen autonomer Fahrzeuge auf die Bevölkerungsverteilung zwischen Stadt und Peripherie: Fallbeispiel Schweiz“ selbständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Falle durch Angabe der Quelle (auch der verwendeten Sekundärliteratur) als Entlehnung kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen und wurde auch noch nicht veröffentlicht.

Zürich, den 28. August 2017
