



Räumlich-differenzierte Auswirkungen des automatisierten Fahrens

**Les effets territoriaux différenciés de la conduite
automatisée**

Spatially-differentiated effects of automated driving

RZU | Planungsdachverband Region Zürich und Umgebung
Angelus Eisinger
Eva-Maria Kopf
Maren Peter
Sabina Uffer (KEEAS AG)

Technische Universität Wien – Institut für Raumplanung
Martin Berger (MOVE)
Rudolf Scheuvs (future.lab)
Florian Pühringer (MOVE)
Verena Sander (MOVE)

**AustriaTech – Gesellschaft des Bundes für
technologienpolitische Maßnahmen GmbH**
Mathias Mitteregger
Aggelos Soteropoulos

**Forschungsprojekt MB4_20_00A_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Mobilität 4.0. (MB4)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Räumlich-differenzierte Auswirkungen des automatisierten Fahrens

**Les effets territoriaux différenciés de la conduite
automatisée**

Spatially-differentiated effects of automated driving

RZU | Planungsdachverband Region Zürich und Umgebung
Angelus Eisinger
Eva-Maria Kopf
Maren Peter
Sabina Uffer (KEEAS AG)

Technische Universität Wien – Institut für Raumplanung
Martin Berger (MOVE)
Rudolf Scheuven (future.lab)
Florian Pühringer (MOVE)
Verena Sander (MOVE)

**AustriaTech – Gesellschaft des Bundes für
technologienpolitische Maßnahmen GmbH**
Mathias Mitteregger
Aggelos Soteropoulos

**Forschungsprojekt MB4_20_00A_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe
Mobilität 4.0 (MB4)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Angelus Eisinger

Mitglieder

Eva-Maria Kopf

Maren Peter

Sabina Uffer

Martin Berger

Rudolf Scheuven

Florian Pühringer

Verena Sandner

Mathias Mitteregger

Aggelos Soteropoulos

Begleitkommission

Präsident

Markus Nollert

Mitglieder

Kay W. Axhausen

Caroline Beglinger Fedorova

Hauke Fehlberg

Michael Löchl

Markus Maibach

Fabienne Perret

Thomas Sauter-Servaes

Paul Schneeberger

Thomas Stoiber

Rupert Wimmer

KO-Finanzierung des Forschungsprojekts

Kanton Zürich, Amt für Mobilität

Tiefbauamt Stadt Zürich

Antragsteller

Arbeitsgruppe Mobilität 4.0

Bezugsquelle

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

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	12
1 Ausgangslage und Fokus des Projekts	15
1.1 Ausgangslage	15
1.2 Ziele und Ablauf des Forschungsprojekts	16
1.3 Methodik und Datengrundlage	17
1.4 Fokus	18
2 Fallbeispiel RZU-Gebiet	23
2.1 Das RZU-Gebiet als Untersuchungsraum	23
2.2 Raumplanerische und verkehrliche Zielsetzungen	25
2.3 Gebietstypen	27
2.3.1 Methodik und Datengrundlage	28
2.3.2 Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss	29
2.3.3 Peripheres Zentrumsgebiet	30
2.3.4 Dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss	31
2.3.5 Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss	32
2.3.6 Dörfliches Gebiet mit Bahnanschluss	33
2.3.7 Dörfliches Gebiet mit MIV-Orientierung	34
2.3.8 Innenstadt Zürich	35
3 Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge	37
3.1 Einleitung und Stand der Forschung	37
3.2 Methodik	38
3.2.1 Framework für die Bewertung der Befahrbarkeit von Strassennetzen für automatisierte Fahrzeuge	38
3.2.2 Festlegung auf Strassennetz und Ableitung von Indikatoren für die Komponenten des Frameworks für die RZU-Region	41
3.2.3 Gewichtung der Komponenten, Kalibrierung und Gesamtindex aF-Befahrbarkeit	48
3.3 Ergebnisse: Fallbeispiel aF-Befahrbarkeit RZU-Gebiet	50
3.3.1 Makro-Ebene: aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes im gesamten RZU-Gebiet	50
3.3.2 Meso-Ebene: aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes in den Gebietstypen	55
3.3.3 Mikro-Ebene: aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes nach Strassentypen	56
3.4 Fazit und Schlussfolgerungen	58
3.5 Limitationen und Forschungsbedarf	58
4 Erreichbarkeitsanalyse für kollektive automatisierte Angebotsformen	61
4.1 Einleitung und Stand der Forschung	61
4.2 Methodik	63
4.2.1 Aufbau Erreichbarkeitsmodell	63
4.2.2 Verwendete Datengrundlagen	63
4.2.3 Bestimmung der Quellen und Ziele des Erreichbarkeitsmodells	64
4.2.4 Berechnung der Fahrzeiten Fuss, Velo, ÖV und MIV	66
4.2.5 Berechnung Erreichbarkeitspotenzial Fuss, Velo, ÖV und MIV	70
4.2.6 Erreichbarkeitsmodell für automatisierte Angebotsformen	71
4.2.7 Berechnung der Fahrzeiten für automatisierte Angebotsformen	74
4.2.8 Ermittlung Erreichbarkeitspotenzial und Erreichbarkeitsveränderung	77
4.3 Ergebnisse	77
4.3.1 Makro-Ebene: Veränderung Erreichbarkeitspotenzial Fallbeispiel RZU	78
4.3.2 Meso-Ebene: Erreichbarkeitspotenzial nach Gebietstypen	85
4.3.3 Mikro-Ebene: Zoom-In Schlieren-Urdorf	86
4.4 Fazit und Schlussfolgerungen	88
4.5 Limitationen und Forschungsbedarf	89

5	Veränderte Flächenbedarfe durch kollektive, automatisierte Angebotsformen im Level 4	93
5.1	Einleitung	93
5.2	Stand der Forschung	94
5.2.1	Fahrbahn	94
5.2.2	Parkieren / Halten	95
5.2.3	Weitere assoziierte Funktionen	97
5.2.4	Zwischenfazit: die Relevanz räumlicher Wirkungen des kollektiven aF im Fallbeispiel	98
5.2.5	Potenzielle Nutzungskonflikte	100
5.2.6	Strassenräumliche Verträglichkeit	100
5.3	Abschätzung der Flächenentwicklungsdynamik	101
5.3.1	Pkw-assoziierte Flächen	102
5.4	Ergebnisse	104
5.4.1	Makro-Ebene: Potenzialflächen im RZU-Gebiet	106
5.4.2	Meso-Ebene: Verteilung der Potenzialflächen in den Gebietstypen	108
5.4.3	Mikro-Ebene: Gegenüberstellung von Flächenpotenzialen in möglichen aF-Betriebsgebieten	110
5.5	Fazit und Schlussfolgerungen	113
5.5.1	Limitationen und Forschungsbedarf	114
6	Auswirkungen auf raum- und verkehrs-planerische Zielsetzungen am Fallbeispiel RZU-Gebiet	115
6.1	Ebene RZU-Gebiet (Makro)	115
6.1.1	Interpretation der Ergebnisse	115
6.1.2	Abgleich mit raumplanerischen Zielsetzungen	117
6.1.3	Chancen und Risiken	120
6.2	Ebene Gebietstypen, Gemeinden (Meso)	124
6.2.1	Interpretation der Ergebnisse	124
6.2.2	Abgleich mit raumplanerischen Zielsetzungen	125
6.2.3	Chancen und Risiken	126
6.3	Ebene innerhalb der Gebietstypen, Strassenraum (Mikro)	127
6.3.1	Interpretation der Ergebnisse	127
6.3.2	Abgleich mit raumplanerischen Zielsetzungen	129
6.3.3	Chancen und Risiken	130
7	Fragen und Handlungsempfehlungen bei der Einführung des (kollektiven) automatisierten Fahrens	133
7.1	Einordnung der Ergebnisse	133
7.2	Offene Fragen und Handlungsempfehlungen	134
7.3	Vertiefung: geordnete Einführung durch aF über die Festlegung von aF-Betriebsgebieten	141
8	Fazit	147
8.1	Zusammenfassung	147
8.2	Relevanz und Übertragbarkeit der Ergebnisse	149
8.3	Weiterer Forschungsbedarf	149
	Anhänge	153
	Glossar und Abkürzungsverzeichnis	155
	Literaturverzeichnis	157
	Projektabschluss	163

Zusammenfassung

Nach der anfänglichen Annahme, automatisiertes Fahren würde das Verkehrssystem schnell und grundlegend verändern, hat sich aus der Forschung und durch die praktischen Erfahrungen mit Pilotprojekten die Erkenntnis durchgesetzt, dass in naher Zukunft ein Einsatz automatisierter Fahrzeuge nur in bestimmten Umfeldbedingungen möglich sein wird. Damit stellt sich die Frage, wo Betriebsgebiete für kollektiv-genutzte automatisierte Fahrzeuge sinnvollerweise eingerichtet werden können und nach welchen Kriterien diese Wahl getroffen werden kann. Der vorliegende Bericht will hierzu einen Beitrag leisten. Am Fallbeispiel des RZU-Gebiets, das sich aus kernstädtischen, suburbanen und ländlichen Teilräumen zusammensetzt, wurde hierfür zunächst die Befahrbarkeit des Strassennetzes aus technischer Sicht für automatisierte Fahrzeuge bewertet. Von dieser prinzipiellen Machbarkeit ausgehend, wurde untersucht, wo der Einsatz kollektiver Angebotsformen automatisierten Fahrens zu einer Verbesserung der Erreichbarkeit im Personenverkehr führen kann. Für die Berechnung der Erreichbarkeit, wurden zwei Angebotsformen kollektiven automatisierten Fahrens in Ergänzung zum bestehenden ÖV-System betrachtet. Diese Ergebnisse der Erreichbarkeitsanalyse wurden vor dem Hintergrund der raum- und verkehrsplanerischen Zielsetzungen bewertet und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Durch die Analyse der Befahrbarkeit wurde deutlich, dass das RZU-Gebiet hinsichtlich des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge keinen homogenen Raum darstellt, sondern das Strassennetz aus technisch-infrastruktureller Sicht ganz unterschiedliche Anforderungen an automatisierte Fahrsysteme stellt. Speziell Bereiche in Industriegebieten und an den Stadträndern traten in dieser Analyse durch besonders gute Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge hervor. Die Befahrbarkeit des Strassennetzes im Zentrum und großen Teilen der Stadt Zürich, in mittleren Städten sowie anderen Siedlungskernen auch in peripheren Lagen ist im Gegensatz dazu tendenziell schlecht (vgl. Kapitel 3).

Um die Veränderung der Erreichbarkeit durch kollektive Angebotsformen des automatisierten Fahrens festzustellen, wurden Erreichbarkeitsanalysen durchgeführt und Erreichbarkeitspotenziale berechnet. Diese Berechnung wurde für das bestehende Verkehrsangebot und eine Erweiterung des öffentlichen Verkehrs durch ein kollektives automatisiertes Angebot auf der letzten Meile, wo dies die Befahrbarkeit zulässt, durchgeführt. Einige Teilräume würden besonders von einer verbesserten Erreichbarkeit durch das zusätzliche Angebot profitieren: tendenziell Randlagen der urbanen Gebiete (am Saum des jeweiligen Siedlungskörpers mit vergleichsweise geringer Nutzungsdichte und grosszügigen Strassenräumen), Gebiete mit Bahnanschluss (vor allem in peripheren Lagen) und die Umgebung von Zentren der Klein- und Mittelstädte. Als Ergänzung wurde eine Variante berechnet, bei der automatisierte Fahrzeuge neben der letzten Meile auch auf Autobahnen unterwegs sein können. Hier profitiert das Umfeld der Autobahnabfahrten, insbesondere Gebiete im Agglomerationsgürtel im Norden und Westen der Stadt Zürich. Zwischenräume, die weder an der Autobahn liegen noch über einen Bahnanschluss verfügen, sowie die Stadt Zürich selbst profitieren in beiden Szenarien kaum bis gar nicht (vgl. Kapitel 4).

Wie neue Verkehrsmittel in der Vergangenheit, werden automatisierte Fahrzeuge neben verkehrlichen auch räumliche Wirkungen auslösen. Um auch diesen Aspekt in der Betrachtung kollektiver Angebotsformen zu berücksichtigen, wurden veränderte Flächenbedarfe, auf Grund einer schlechten Datenlage genähert, quantifiziert. Diese erste Näherung zeigt große, langfristig entstehende Umnutzungspotenziale in der Grössenordnung von 0,5 bzw. 5 km². Neue Flächenbedarfe hingegen entstehen bereits kurzfristig, um das neue Angebot in das bestehende zu integrieren. Im Fall von kollektiven Angebotsformen sind dies Flächen für Depots der Fahrzeuge, Vorhalte- bzw. Parkplatzflächen und vor allem an den Verkehrsdrehscheiben. Ein wesentlicher Aspekt der Veränderung der Flächenbedarfe ist die Ungleichzeitigkeit: neue, moderate Bedarfe entstehen in aF-Betriebsgebieten kurzfristig, während die Parkierungsflächen und Pkw-assoziierten Betriebe durch die Einführung kollektiven automatisierten Fahrens erst langfristig freigesetzt werden. Trotzdem stellen diese Potentialflächen eine relevante

Größe im Kontext einer Innenentwicklung dar, die zu einer tatsächlichen Neuausrichtung des Siedlungsraums im Agglomerationsgürtel genutzt werden könnte (vgl. Kapitel 5).

Bei der Gegenüberstellung der Analyseergebnisse mit den raum- und verkehrsplanerischen Zielsetzungen aller Staatsebenen wurden Chancen für die Erreichung letzterer aber gleichzeitig auch zahlreiche Risiken deutlich. (vgl. Kapitel 6):

- Betrachtet man die Verbesserung der Erreichbarkeit durch kollektive Angebotsformen des automatisierten Fahrens zusammen mit der planerisch angestrebten Dichte von Bevölkerung und Beschäftigten zeigen sich Orte, für die eine Verbesserung wünschbar sein kann. Diese oder ähnliche Analysen sind wertvoll um potenzielle Betriebsgebiete für kaF in wahrscheinlich naher Zukunft gezielt planen zu können.
- Auch mit kollektiver Nutzung ist ohne zielgerichtete Regulierung des Angebotes eine Erreichbarkeitsverbesserung in peripheren Lagen und ausserhalb des Siedlungsgebietes zu erwarten.
- Die Nutzung der Autobahn verbessert die Erreichbarkeit deutlich, jedoch im RZU-Gebiet insbesondere auch in Lagen, für die dies planerisch nicht gewünscht ist. Zudem bedingt die Nutzung der Autobahn durch kollektives automatisiertes Fahren eine betriebliche und infrastrukturelle Integration in das ÖV-System, die einer umfassenden Planung bedarf und erst mittel- bis langfristig möglich ist.
- Mit der Einführung von kollektivem automatisiertem Fahren ergeben sich kurzfristig neue Flächenbedarfe, langfristig werden Flächen für Pkw-assozierte Nutzungen und insbesondere Parkierungsflächen frei werden.

Um die Chancen einer Ergänzung des Verkehrssystems durch Angebote kollektiven automatisierten Fahrens zu nutzen und gleichzeitig den Risiken zu begegnen, ist eine Regulierung des Angebots zwingend. Aufgrund der bisher geringen Erfahrungen mit (kollektiven) automatisierten Angeboten und den mit ihrer Einführung verbundenen Unsicherheiten wurden folgende Fragenkomplexe zur Vertiefung ermittelt (vgl. Kapitel 7):

- Welche Rolle sollte und könnte (kollektives) automatisiertes Fahren in näherer Zukunft in einer Region wie dem RZU-Gebiet spielen?
- Wie unterscheiden sich die Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge und deren strassenräumliche Verträglichkeit? Soll diese Befahrbarkeit gezielt verbessert werden?
- Welche möglichen Veränderungen ergeben sich im Verkehrsangebot/-netz?
- Wie könnten sich Verkehrsdrehscheiben verändern?
- Welche Möglichkeiten ergeben sich zur Neuverteilung des Strassenraums und wie sollen sie genutzt werden?
- Welche Veränderungen sind über den Strassenraum hinaus im Bereich der Flächen zu erwarten? Entstehen neue Flächenbedarfe oder werden durch kollektives automatisiertes Fahren Flächen für andere Nutzungen frei?
- Wie kann die Ausgestaltung von Betriebsgebieten für automatisiertes Fahren diskutiert werden und wie kann ein geeigneter Planungsprozess aussehen?

Aus der Sicht des Projektteams ist der erste und wichtigste Schritt um bei der Einführung von kollektiven automatisierten Angebotsformen Chancen zu nutzen und Risiken zu begegnen, das evidenzbasierte Planen von Betriebsgebieten für automatisiertes Fahren. Diese Planung nimmt in der Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge ihren Ausgang, schließt aber notwendigerweise planerische Fragstellungen mit ein. Diese sind u.a. Fragen wie Wem kommt dieses Angebot zu gute? Oder Wo bestehen aktuell tatsächliche Mobilitätsbedarfe, die mit dieser Technologie befriedigt werden können? Da selbst bei diesem Vorgehen, die Einführung des automatisierten Fahrens mit nicht-abschätzbaren Unsicherheiten behaftet bleibt, wird nach einem ersten Realexperiment zur konkreten Behandlung obiger Fragenkomplexe weiterhin eine begleitende Evaluierung ausgewiesener Betriebsgebiete für automatisiertes Fahren empfohlen, um möglichen Rebounds und anderen verkehrlichen, räumlichen, sozio-ökonomischen und vor allem auch Umwelteffekten frühzeitig begegnen zu können.

Résumé

Après l'hypothèse initiale selon laquelle la conduite automatisée modifierait rapidement et fondamentalement le système de transport, la recherche et l'expérience pratique des projets pilotes ont permis d'établir que, dans un avenir proche, l'utilisation de véhicules automatisés ne sera possible que dans certaines conditions environnementales. La question se pose donc de savoir où il est judicieux d'aménager des zones d'exploitation pour les véhicules automatisés à usage collectif et selon quels critères ce choix peut être fait. Le présent rapport entend apporter une contribution à cet égard. A l'aide de l'exemple de la zone RZU, qui se compose d'espaces urbains, suburbains et ruraux, nous avons tout d'abord évalué la praticabilité du réseau routier d'un point de vue technique pour les véhicules automatisés. Partant de cette faisabilité de principe, il a été examiné où l'utilisation de formes d'offres collectives de conduite automatisée peut conduire à une amélioration de l'accessibilité dans le transport de personnes. Pour le calcul de l'accessibilité, deux formes d'offre de conduite automatisée collective ont été considérées en complément du système de transport public existant. Ces résultats de l'analyse d'accessibilité ont été évalués dans le contexte des objectifs d'aménagement du territoire et de planification des transports, et des recommandations d'action en ont été tirées.

L'analyse de l'accessibilité a mis en évidence que la zone RZU ne représente pas un espace homogène en ce qui concerne l'utilisation de véhicules automatisés, mais que le réseau routier pose des exigences très différentes aux systèmes de conduite automatisée d'un point de vue technique et infrastructurel. Les zones situées dans les zones industrielles et en périphérie des villes se sont distinguées dans cette analyse par une praticabilité particulièrement bonne pour les véhicules automatisés. En revanche, la praticabilité du réseau routier dans le centre et dans de grandes parties de la ville de Zurich, dans les villes moyennes ainsi que dans d'autres centres urbains, y compris dans les zones périphériques, a tendance à être mauvaise (voir également les résultats et la conclusion du chapitre 3).

Afin de déterminer la modification de l'accessibilité par les formes d'offre collective de la conduite automatisée, des analyses d'accessibilité ont été réalisées et des potentiels d'accessibilité ont été calculés. Ce calcul a été effectué pour l'offre de transport existante et pour une extension des transports publics par une offre collective automatisée sur le dernier kilomètre, là où la praticabilité le permet. Certains sous-espaces profiteraient particulièrement d'une amélioration de l'accessibilité grâce à l'offre supplémentaire : tendancielle, les zones périphériques des zones urbaines (à la lisière du corps d'agglomération concerné, avec une densité d'utilisation relativement faible et des espaces routiers généreux), les zones desservies par les chemins de fer (surtout dans les zones périphériques) et les environs des centres des petites et moyennes villes. En complément, une variante a été calculée, dans laquelle les véhicules automatisés peuvent circuler sur les autoroutes en plus du dernier kilomètre. Dans ce cas, ce sont les alentours des sorties d'autoroute qui en profitent, en particulier les zones de la ceinture d'agglomération au nord et à l'ouest de la ville de Zurich. Les zones intermédiaires qui ne sont pas situées le long de l'autoroute et qui ne disposent pas d'un raccordement ferroviaire, ainsi que la ville de Zurich elle-même, n'en profitent guère, voire pas du tout, dans les deux scénarios (voir également le résultat et la conclusion au chapitre 4).

Comme les nouveaux moyens de transport dans le passé, les véhicules automatisés auront non seulement des effets sur la circulation, mais aussi sur l'espace. Afin de prendre en compte cet aspect dans la réflexion sur les formes d'offre collective, les besoins en surface modifiés ont été quantifiés de manière approximative en raison d'une mauvaise disponibilité des données. Cette première approximation montre d'importants potentiels de changement d'affectation qui apparaissent à long terme, de l'ordre de 0,5 ou 5 km². En revanche, de nouveaux besoins en surface apparaissent déjà à court terme pour intégrer la nouvelle offre à l'offre existante. Dans le cas des formes d'offres collectives, il s'agit de surfaces pour le dépôt des véhicules, de surfaces d'attente ou de stationnement et, surtout, aux plates-formes de transport. Un aspect essentiel de la modification des besoins en surface est le décalage : de nouveaux besoins modérés apparaissent à court terme dans

les zones d'exploitation aF, tandis que les surfaces de stationnement et les exploitations associées aux voitures ne seront libérées qu'à long terme par l'introduction de la conduite automatisée collective. Néanmoins, ces surfaces potentielles représentent une taille pertinente dans le contexte d'un développement interne qui pourrait être utilisé pour une véritable réorientation de l'espace urbain dans la ceinture de l'agglomération (voir également le résultat et la conclusion du chapitre 5).

La confrontation des résultats de l'analyse avec les objectifs d'aménagement du territoire et de planification des transports à tous les niveaux de l'Etat a mis en évidence des opportunités pour la réalisation de ces derniers, mais également de nombreux risques. (voir chapitre 6) :

- Si l'on considère l'amélioration de l'accessibilité par des formes d'offres collectives de la conduite automatisée en même temps que la densité de population et d'employés visée par la planification, il apparaît des endroits pour lesquels une amélioration peut être souhaitable. Ces analyses ou d'autres analyses similaires sont précieuses pour pouvoir planifier de manière ciblée des zones d'exploitation potentielles pour les kaF dans un avenir probablement proche.
- Même avec une utilisation collective, il faut s'attendre à une amélioration de l'accessibilité dans les situations périphériques et en dehors des zones d'habitation sans régulation ciblée de l'offre.
- L'utilisation de l'autoroute améliore nettement l'accessibilité, mais dans la zone RZU, en particulier aussi dans des endroits pour lesquels cela n'est pas souhaité du point de vue de la planification. De plus, l'utilisation de l'autoroute par la conduite automatisée collective nécessite une intégration opérationnelle et infrastructurelle dans le système de transport public, qui nécessite une planification globale et n'est possible qu'à moyen ou long terme.
- L'introduction de la conduite automatisée collective entraînera à court terme de nouveaux besoins en surface, et à long terme, des surfaces seront libérées pour des usages associés à la voiture, et notamment pour le stationnement.

Afin d'exploiter les opportunités de compléter le système de transport par des offres de conduite automatisée collective tout en faisant face aux risques, une régulation de l'offre est impérative. En raison du peu d'expérience acquise jusqu'à présent avec les offres (collectives) automatisées et des incertitudes liées à leur introduction, les séries de questions suivantes ont été identifiées pour être approfondies (cf. chapitre 7) :

- Quel rôle devrait et pourrait jouer la conduite automatisée (collective) dans un avenir proche dans une région telle que la zone RZU ?
- Comment la praticabilité pour les véhicules automatisés et la compatibilité avec l'espace routier se distinguent-elles ? Cette praticabilité doit-elle être améliorée de manière ciblée ?
- Quelles sont les modifications possibles de l'offre/du réseau de transport ?
- Comment les plates-formes de transport pourraient-elles évoluer ?
- Quelles sont les possibilités de redistribution de l'espace routier et comment doivent-elles être utilisées ?
- Quels changements sont à prévoir au-delà de l'espace routier en termes de surfaces ? De nouveaux besoins en surface apparaissent-ils ou la conduite automatisée collective libère-t-elle des surfaces pour d'autres utilisations ?
- Comment l'aménagement des zones d'exploitation pour la conduite automatisée peut-il être discuté et à quoi peut ressembler un processus de planification approprié ?

Du point de vue de l'équipe de projet, la première et la plus importante étape pour saisir les opportunités et éviter les risques lors de l'introduction de formes d'offres collectives automatisées consiste à planifier les zones d'exploitation pour la conduite automatisée sur la base de données probantes. Cette planification prend comme point de départ la praticabilité du réseau routier pour les véhicules automatisés, mais elle inclut nécessairement des questions de planification. Il s'agit notamment de questions telles que : à qui profite cette offre ? Ou encore, où se situent actuellement les besoins réels de mobilité qui peuvent être satisfaits par cette technologie ? Même avec cette approche, l'introduction de la conduite automatisée reste entachée d'incertitudes impossibles à évaluer. C'est pourquoi, après une première expérience en situation réelle, il est recommandé de procéder à une évaluation des zones d'exploitation désignées pour la conduite automatisée afin d'anticiper les éventuels rebonds et autres effets sur le trafic, l'espace, l'économie et surtout l'environnement.

Summary

After the initial assumption that automated driving would quickly and fundamentally change the transport system, research and practical experience with pilot projects have led to the realisation that in the near future, the use of automated vehicles will only be possible in certain environmental conditions. This raises the question of where operational areas for collectively used automated vehicles can be sensibly established and according to which criteria this choice can be made. The report at hand aims to make a contribution to this question. Using the case study of the RZU area, which is composed of core urban, suburban and rural sub-areas, the drivability of the road network for automated vehicles was first assessed from a technical point of view. Starting from this basic feasibility, it was examined where the use of collective forms of automated driving could lead to an improvement of accessibility in passenger transport. For the calculation of accessibility, two service forms of collective automated driving were considered in addition to the existing public transport system. The results of the accessibility analysis were evaluated against the background of spatial and transport planning objectives and recommendations for action were derived.

Through the analysis of accessibility, it became clear that the RZU area does not represent a homogeneous space with regard to the use of automated vehicles, but that the road network places very different requirements on automated driving systems from a technical-infrastructure point of view. Especially areas in industrial zones and on the outskirts of cities stood out in this analysis due to their particularly good drivability for automated vehicles. In contrast, the drivability of the road network in the centre and large parts of the city of Zurich, in medium-sized cities as well as other settlement cores also in peripheral locations tends to be poor (cf. chapter 3).

In order to determine the change in accessibility due to collective forms of automated driving, accessibility analyses were carried out and accessibility potentials were calculated. This calculation was carried out for the existing public transport offer and an extension by a collective automated offer on the last mile, where the drivability allows this. Some sub-areas would particularly benefit from improved accessibility through the additional service: tendentially peripheral areas of urban areas (at the edge of the respective settlement body with comparatively low use density and generous road spaces), areas with rail connections (especially in peripheral locations) and the surroundings of centres of small and medium-sized towns. As a supplement, a variant was calculated in which automated vehicles can also travel on motorways in addition to the last mile. Here, the surroundings of motorway exits benefit, especially areas in the agglomeration belt in the north and west of the city of Zurich. Intermediate areas that are neither near the motorway nor have a rail connection, as well as the city of Zurich itself, benefit little or not at all in both scenarios (cf. chapter 4).

Like new means of transport in the past, automated vehicles will trigger spatial effects in addition to traffic effects. In order to take this aspect into account in the consideration of collective forms of supply, changed space requirements were quantified, due to a poor data situation only approximatively. This first approximation shows large, long-term conversion potential on the scale of 0.5 or 5 km². New space requirements, on the other hand, already arise in the short term in order to integrate the new offer into the existing one. In the case of collective service forms, these are areas for vehicle depots, holding and parking areas and, above all, at the transport hubs. A key aspect of the change in land requirements is the non-simultaneity: new, moderate requirements arise in operating areas of automated driving immediately, while parking areas and car-associated businesses are only released in the long term as a consequence of the introduction of collective automated driving. Nevertheless, these potential areas represent a relevant quantity in the context of an spatial densification that could be used for an actual realignment of the settlement area in the agglomeration belt (cf. chapter 5).

When comparing the results of the analysis with the spatial and transport planning objectives of all levels of government, opportunities for achieving the latter but at the same time numerous risks became clear. (cf. Chapter 6):

- Considering the improvement of accessibility through collective forms of automated driving together with the density of population and employees targeted by planning reveals places for which an improvement may be desirable. These or similar analyses are valuable to target potential operational areas for collective automated driving in the probably near future.
- Without targeted regulation of supply, accessibility improvements in peripheral locations and outside the settlement area can be expected even with collective use.
- The use of the motorway significantly improves accessibility, but in the RZU area in particular in locations for which this is not desired in planning terms. In addition, the use of the motorway by collective automated driving requires operational and infrastructural integration into the public transport system, which requires comprehensive planning and is only possible in the medium to long term.
- With the introduction of collective automated driving, additional space requirements will arise in the short term; in the long term, space for car-associated uses and in particular for parking areas will be freed up.

In order to use the opportunities of supplementing the transport system with offers of collective automated driving and at the same time counteract the risks, regulation of the offer is imperative. Due to the limited experience with the availability of (collective) automated transport facilities to date and the uncertainties associated with their introduction, the following sets of questions were identified for further consideration (cf. chapter 7):

- What role should and could (collective) automated driving play in the near future in a region like the RZU area?
- How do the drivability for automated vehicles and the road space compatibility differ? Should there be a focus on improving this drivability?
- What are the possible changes in the public transport offer/network?
- How could traffic hubs change?
- What opportunities are there for redistributing road space and how should they be used?
- What changes are to be expected in the area of space beyond the road space? Will new space requirements arise or will collective automated driving free up space for other uses?
- How can the design of operational areas for automated driving be discussed and what can a suitable planning process look like?

From the perspective of the project team, the first and most important step in order to take advantage of opportunities and counteract risks when introducing collective automated forms of supply is the evidence-based planning of operational areas for automated driving. This planning starts with the drivability of the road network for automated vehicles, but necessarily includes planning issues. These include questions such as: Who will benefit from this service? Or, where are to date actual mobility needs that can be met with this technology? Since even with this approach, the introduction of automated driving remains fraught with uncertainties that cannot be assessed, an accompanying evaluation of designated operational areas for automated driving is still recommended after an initial real-life experiment to specifically address the complex of questions above, in order to be able to counteract possible rebounds and other traffic, spatial, socio-economic and, above all, environmental effects at an early stage.

1 Ausgangslage und Fokus des Projekts

1.1 Ausgangslage

Automatisiertes Fahren war in den vergangenen Jahren eines der diskursbestimmenden Themen der Verkehrs- und Mobilitätsforschung. Nach einer frühen Phase des Hypes, sind jüngere Studien zurückhaltender – vor allem die technologische Machbarkeit betreffend. Zum aktuellen Zeitpunkt, und das bestätigen auch die weltweit durchgeführten Testbetriebe, wird nicht mehr davon ausgegangen, dass Automatisierung in näherer Zukunft den Menschen in allen Fahraufgaben, verkehrlichen Konstellationen oder allgemein während aller Umfeldbedingungen die Menschen meistern, ersetzen wird können. In der Logik der weitverbreiteten Automatisierungslevels der SAE (SAE J3016) bedeutet dies, dass mit einem „Langen Level 4“ gerechnet werden muss, währenddessen automatisierte Fahrzeuge in bestimmten Anwendungsbereichen oder Betriebsgebieten eingesetzt werden können, nicht aber im gesamten Strassenverkehrssystem.

Diese Neubewertung hat auch für die Schweiz Folgen und lässt wenigstens kurzfristig eine klare Fokussierung zu: Für die kommenden Jahre stellt sich die Frage, wo aF-Betriebsgebiete technologisch machbar und verkehrs- und raumplanerisch sinnvoll sind. Dieser Fokus macht es möglich, dass in Verkehrs- und Raumplanung mit den Vorbereitungen auf diese Phase begonnen werden kann.

Der vorliegende Bericht will hierzu einen Beitrag leisten. Am Fallbeispiel des RZU-Gebiets dem Planungsdachverband der Agglomeration Zürich, die sich aus kernstädtischen, suburbanen und ländlichen Teilräumen zusammensetzt, wird die Befahrbarkeit des Strassenverkehrsnetzes für automatisierte Fahrzeuge bewertet. Für die darauf aufbauenden Wirkungsanalysen wurde eine klare Abgrenzung vorgenommen. Untersucht wird der Personenverkehr und hier zwei Angebotsformen eines kollektiven automatisierten Fahrens (kaF) in Ergänzung zum öffentlichen Verkehr (ÖV). Diese Entscheidung wurde vor dem Hintergrund getroffen, dass Arbeiten in einem großangelegten Forschungsschwerpunkt des Bundesamts für Strassen ASTRA zum automatisierten Fahren zu dem Schluss gekommen sind, dass eine unkontrollierte Entwicklung in Richtung eines individuell-genutzten automatisierten Fahrens zu „übermäßigem Mehrverkehr [führt, der] den insbesondere die Städte und Agglomerationen nicht bewältigen können (Fehlberg et al. 2020: 7).

Die Einführung von automatisierten Fahrzeugen stellt zusammengefasst eine Herausforderung dar, die neben den Aspekten der Sicherheit und Akzeptanz vertiefter Kenntnisse zu den räumlich-differenzierten Auswirkungen folgender Aspekte bedarf, die in diesem Forschungsprojekt angegangen werden:

- die konkreten technischen Limitationen eines Einsatzes von automatisierten Fahrzeugen und davon abgeleitet die Befahrbarkeit des Strassennetzes,
- die Veränderungen der Erreichbarkeit durch automatisierte Anwendungsformen und resultierende Potenziale,
- die Veränderungen des Flächenbedarfes für den motorisierten Individualverkehr (MIV) und für zukünftige Anwendungsformen des automatisierten Fahrens und
- die Chancen und Risiken für die verkehrs- und raumplanerischen Zielsetzungen auf allen Staatsebenen.

Insbesondere zu konkreten räumlichen Auswirkungen und veränderten Flächenbedarfen des automatisierten Fahrens gibt es bisher kaum vertiefende Studien.

1.2 Ziele und Ablauf des Forschungsprojekts

Das Ziel des Forschungsprojektes ist das Aufzeigen von verkehrlich-räumlichen Entwicklungspotenzialen, die sich in Folge der schrittweisen Verbreitung von automatisiertem Fahren ergeben. Hierzu werden räumlich-differenzierte Analysen erarbeitet, die die Wirkung des automatisierten Fahrens im RZU-Gebiet abbilden können. Eine Analyse der Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge bildet dafür die Basis. Ausserdem können durch die Analyse von Erreichbarkeitspotenzialen und veränderten Flächenbedarfen die Chancen und Risiken für bestehende raum- und verkehrsplanerische Ziele (gemäss Bundesgesetz über die Raumplanung RPG, Sachplan Verkehr, Richtpläne, etc.) abgebildet werden. Es soll damit eine Grundlage erstellt werden, die weiteren Handlungsempfehlungen für Politik und Verwaltung auf allen Handlungsebenen offenlegt und Fragenkomplexe zur Vertiefung beschreibt.

Das Vorgehen im Projekt lässt sich folgendermassen beschreiben:

- Der in der vorliegenden Studie verwendete Ansatz, der anhand des RZU-Gebiets die technisch-infrastrukturelle Befahrbarkeit des Strassennetzes untersucht und bewertet, nutzt diese Befahrbarkeit auch als Grundlage für die Analyse der Veränderung der Erreichbarkeit durch den Einsatz automatisierter Fahrzeuge auf der letzten Meile zum öffentlichen Verkehr sowie auf der Autobahn (vgl. Kap. 1.4).
- Dies ermöglicht Erkenntnisse darüber, in welchen Gebieten bei solchen Einsatzformen automatisierter Fahrzeuge räumlich-differenziert Erreichbarkeitsgewinne erzielt werden können. Darüber hinaus wird abgeleitet, welche Veränderungen in der Flächennutzung entstehen, wenn als Teil der Mobilitätswende und Technologieentwicklung der Anteil des MIV abnimmt und durch eine kollektive Nutzung automatisierter Fahrzeuge ersetzt wird (vgl. Abb. 1).
- Die Erkenntnisse weisen auf Chancen und Risiken für die räumlichen und verkehrlichen Zielsetzungen im RZU-Gebiet hin.
- Gleichzeitig geben sie Hinweise, wie eine geordnete Einführung von aF erfolgen kann und welche (räumlichen) Aspekte dabei berücksichtigt werden sollten.



Abb. 1 Wirkungsgefüge Raumnutzung und Verkehr (eigene Darstellung auf Basis von Wegener & Fürst (1999) und Bertolini (2012))

In Abb. 2 ist der gesamte Forschungsablauf seit Juli 2021 schematisch dargestellt. Dabei wurden immer wieder Expert:innen und Stakeholder aus Wissenschaft und Praxis hinzugezogen, um die Zwischenergebnisse zu validieren, zu kalibrieren und zu spiegeln.

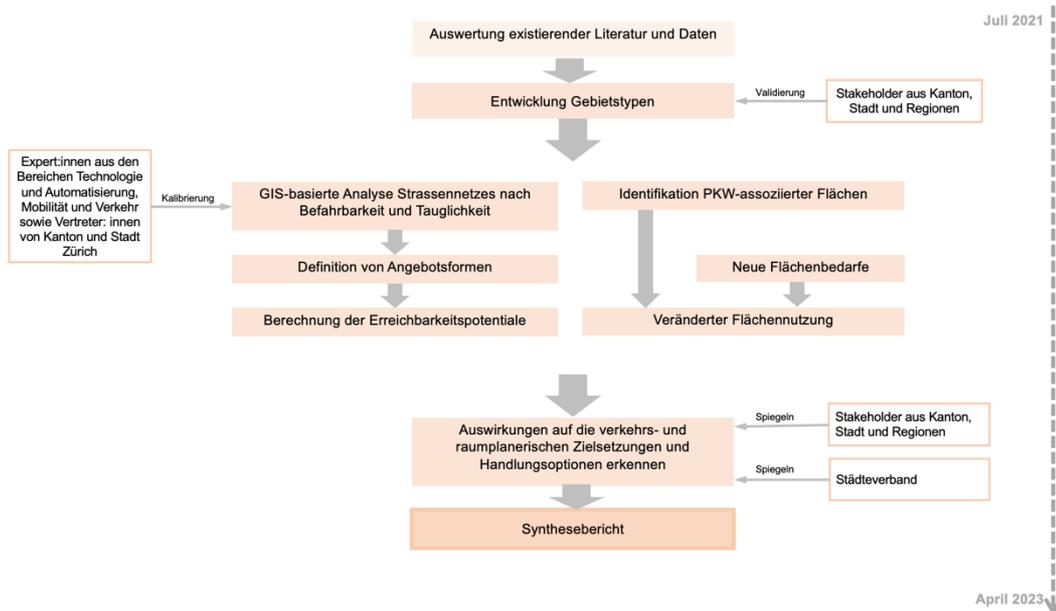


Abb. 2 Ablauf des Forschungsprojektes

1.3 Methodik und Datengrundlage

Nachfolgend beschriebene Methodik wird auf das Fallbeispiel des RZU-Gebiets angewendet.

Für die Beurteilung der Tauglichkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge wurde auf Basis des topographischen Landschaftsmodells (TLM) ein Netz mit etwa 100 m langen Kanten erstellt. Im Rahmen einer GIS-basierten Raumanalyse wurden diese Kanten nach Kategorien bewertet und Indikatoren abgeleitet – etwa für die Anzahl der Objekte im Strassenraum, die Verschiedenheit der Objekte im Strassenraum, der Zustand und die Konfiguration der Strasseninfrastruktur, Geschwindigkeitslimits aber auch Stabilität der Operational Design Domain (ODD) etwa durch Wetter- und Klimaeinflüsse. Die Kombination der Indikatoren je Kategorie ergibt einen Wert für die aF-Befahrbarkeit, welcher für jeden Strassenabschnitt die Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge repräsentiert.

Die Beurteilung der Erreichbarkeit erfolgte ebenfalls für das gesamte RZU-Gebiet anhand eines Potenzialmodells. In einer räumlichen Auflösung von 100 m wurde zuerst für die Modi Fussverkehr, Veloverkehr, motorisierter Individualverkehr (MIV) und öffentlicher Verkehr (ÖV) ein Erreichbarkeitspotenzial berechnet. In einem nächsten Schritt wurden die zuvor ermittelten Werte der aF-Befahrbarkeit als Raumwiderstand in das ÖV-Erreichbarkeitsmodell integriert und so ein kollektives Angebot mit automatisierten Angebotsformen modelliert. Der Vergleich des Erreichbarkeitspotenzials zwischen dem ÖV und den automatisierten Angebotsformen gibt räumlich differenziert Aufschluss darüber, welche Regionen in welchem Ausmass von dieser neuen Angebotsform profitieren könnten und in welchen Regionen die Veränderungseffekte klein bzw. nicht vorhanden sind.

Die Abschätzung der Pkw-assozierten Flächenbedarfe erfolgte über unterschiedliche Methodiken, wobei aufgrund der Datenlage meist nur Annäherungen möglich waren. Die Parkierungsflächen wurden über eine umfassende Literaturanalyse und daraus abgeleitete Kennwerte für das RZU-Gebiet geschätzt und angenähert, da ausserhalb der Stadt Zürich keine belastbaren Daten zur Verfügung standen. Die Pkw-assozierten Betriebe wurden aus den zur Verfügung gestellten kleinräumigen STATENT-Daten (Unternehmensstatistik) gefiltert und anschliessend mit der Gebäudegrundfläche aus dem eidgenössischen Gebäude- und Wohnungsregister verschnitten. Die Ergebnisse zur aF-Befahrbarkeit und Erreichbarkeit wurden für die Festlegung der Beispiele für aF-Betriebsgebiete verwendet.

Für die Analysen zur aF-Befahrbarkeit und Erreichbarkeitspotenziale sowie zur Ermittlung der Pkw-assozierten Flächen ist eine Vielzahl unterschiedlicher Daten nötig. Abb. 3 zeigt in der obersten Zeile den notwendigen Datenbedarf. Über open data hinausgehende Datenbedarfe sind einerseits STATENT vom Bundesamt für Statistik und andererseits eine Vielzahl von Daten zu Strassennetz und Infrastruktur, die die Projektpartner Stadt und Kanton Zürich über ihr öffentlich verfügbares Datenangebot hinaus für das Projekt bereitstellten. Der detaillierte Datenbedarf wird in den jeweiligen Analysekapiteln erläutert.

Untersuchungsraum ist das RZU-Gebiet (vgl. Kap. 2.1), für das die räumlichen und verkehrlichen Zielsetzungen aus den raumplanerischen Instrumenten den Ergebnissen aus den Analysen gegenübergestellt werden. Alle Analysen und der Abgleich mit den Zielsetzungen werden sowohl für den Gesamttraum als auch für einzelne Gebietstypen und deren Beispiele durchgeführt, die für charakteristische Strukturen im RZU-Gebiet stehen. Abschliessend werden Erkenntnisse hinsichtlich Chancen und Risiken der Einführung des automatisierten Fahrens gewonnen und Handlungsempfehlungen sowie weiterführende Fragenkomplexe mit dem Ziel einer geregelten Einführung abgeleitet.

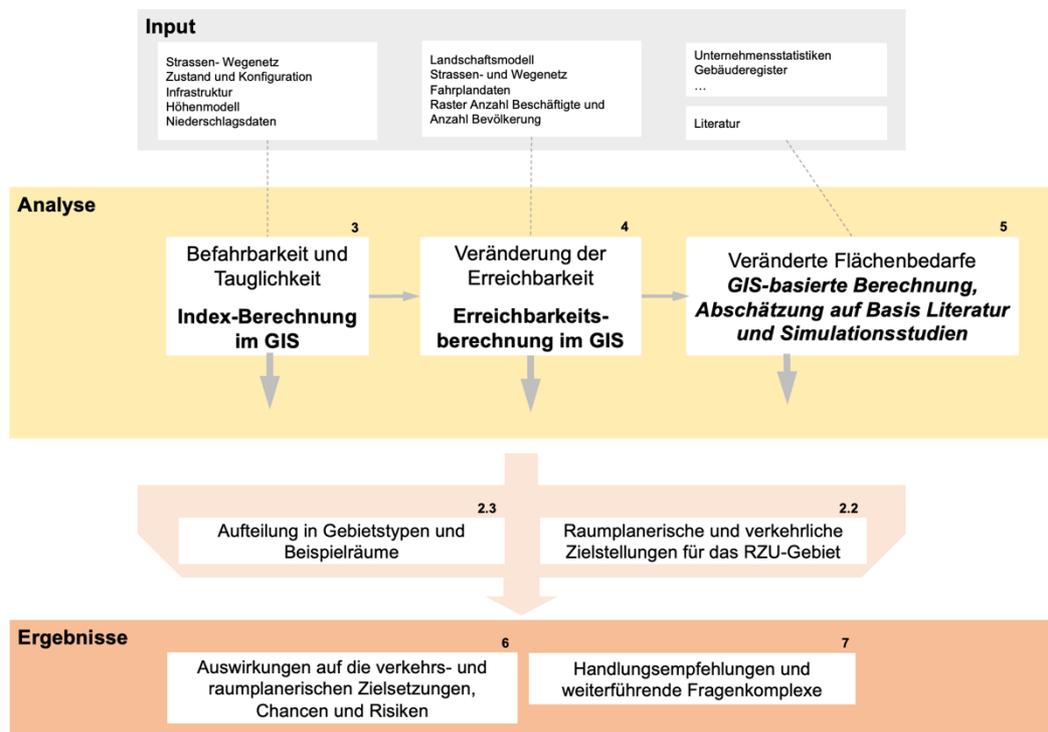


Abb. 3 Methodisches Vorgehen und verwendete Datengrundlage inkl. Verweis auf Kapitel

1.4 Fokus

Die möglichen Auswirkungen von automatisiertem Fahren lassen sich in diesem Forschungsprojekt nicht allumfassend untersuchen. Nachfolgend wird die Fokussierung erläutert.

So wird im vorliegenden Projekt ausschliesslich die Phase des Mischverkehrs automatisierter Fahrzeuge des Level 4 mit konventionellen Fahrzeugen betrachtet, wenn nach und nach zunehmend mehr automatisierte Fahrzeuge in weiteren Teilen des RZU-Gebietes unterwegs sein werden. Ausgehend vom aktuellen räumlichen und verkehrlichen Zustand werden die Veränderungen auf Erreichbarkeit und Raum während der schrittweisen Einführung automatisierter Angebotsformen auf Basis der Analysen antizipiert und ihre Folgen diskutiert. Abb. 4 zeigt diesen Zeithorizont auf.

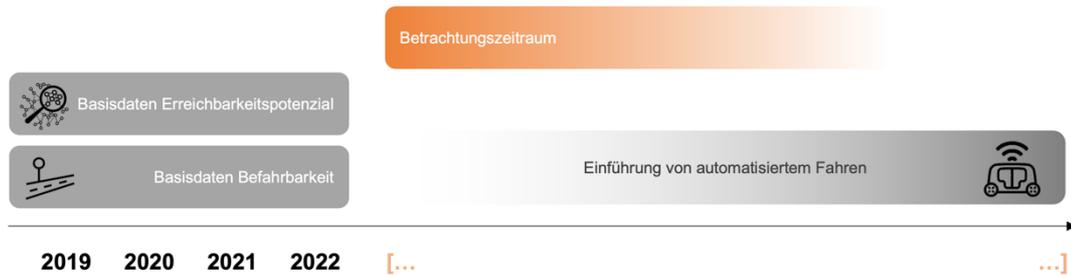


Abb. 4 Analyse- und Betrachtungszeitraum im Projekt

Darüber hinaus werden folgende weitere Abgrenzungen vorgenommen:

- Es wird keine Verkehrsmodellierung durchgeführt.
- Die Kapazität und Auslastung des Verkehrsnetzes wird nicht berücksichtigt.
- Die Bevölkerungs- und Beschäftigtenentwicklung wird räumlich differenziert aus den kantonalen und regionalen Zielsetzungen im RZU-Gebiet übernommen. Es werden keine Szenarien entwickelt.
- Die Erreichbarkeitsanalyse basiert auf groben Annahmen zu den Angebotsformen.
- Es werden alleinig die Auswirkungen des automatisierten Fahrens betrachtet.

In der Darstellung der Ergebnisse und Erkenntnisse werden die Auswirkungen des automatisierten Fahrens nach verschiedenen Ebenen betrachtet (vgl. Abb. 5). So kann die Übertragbarkeit auf verschiedenen Stufen gewährleistet werden. Die Makro-Ebene stellt im Fallbeispiel das RZU-Gebiet dar. Hier kommt eine übergeordnete Betrachtungsweise auf (über-)regionaler Ebene zum Einsatz. Darunter werden auf der Meso-Ebene die Gebietstypen verglichen, die Siedlungsgebiete und Gemeinden nach verschiedenen Aspekten kategorisieren. Darunter werden auf der Mikro-Ebene eine kleingliedrigere Analyse und Interpretation auf Gemeinde- und Arealebene vorgenommen sowie auf generellem Niveau die einzelnen Strassenräume betrachtet. Die Aussagen auf der Mikro-Ebene können aufgrund der unzureichenden räumlichen Auflösung der Analysen und der getroffenen Abgrenzungen nicht räumlich konkret formuliert werden. Einzelne Zielsetzungen, Ergebnisse und Erkenntnisse sind auf mehreren Ebenen relevant.



Abb. 5 Betrachtungsebenen

Kollektives automatisiertes Fahren

Mit der Einführung des automatisierten Fahrens als individuelle Nutzung haben zahlreiche Studien zu verkehrlichen Wirkungen Bedenken verbunden. Aufgrund einer erwarteten grossen Anzahl von Fahrten inkl. Leerfahrten, wird davon ausgegangen, dass das Strassenverkehrssystem weiterhin stark überlastet ist sowie der Flächenverbrauch und die

Trennwirkung auch mit automatisierten Fahrzeugen hoch sind. Mit einer kollektiven Nutzung automatisierter Fahrzeuge wird die Hoffnung verbunden, dass die negativen Auswirkungen begrenzt werden können und beispielsweise die Erreichung der Klimaneutralität wahrscheinlicher wird. Neuere Studien auf Bundesebene betonen dabei die Bedeutung des Beitrags des Verkehrssektors zur Erreichung der Klimaneutralität (BAV 2022). Die Hintergrundberichte zur Perspektive BAHN 2050 kommen zum Schluss, dass die Annahmen in den Verkehrsperspektiven 2050 für dieses Ziel nicht ausreichend sind und eine stärkere Verlagerung erreicht werden muss (Infras 2021).

In dieser Studie wird für die Angebotsformen automatisierten Fahrens im Personenverkehr jeweils eine kollektive Nutzung angenommen, um diese Variante in ihren Auswirkungen und Potenzialen zu vertiefen. Als kollektive Nutzung bzw. On-demand-Verkehr wird die kollektive Mobilität als geteilte Fahrt bezeichnet. Die Festlegung auf zwei Nutzungsformen in einer frühen Phase, in der Level 4-Fahrzeuge nur in bestimmten, freigegebenen Bereichen operieren, ist mit aktuellen rechtlichen Entwicklungen rund um den Einsatz von Level 4-Fahrzeugen in der EU im Einklang.

Als Rückgrat des öffentlichen Verkehrsnetzes wird dabei weiterhin vom öffentlichen Verkehr in seiner heutigen Form ausgegangen, da Fahrgäste so (flächen-) effizient befördert werden können. Eine kollektive Nutzung automatisierten Fahrens ist darum in Ergänzung zum bestehenden öffentlichen Verkehr und nur in Einzelfällen als Ersatz zu verstehen.

Kollektives automatisiertes Fahren auf der letzten Meile (vgl. Abb. 6, grün) kann dabei als Weg zur nächsten ÖV-Haltestelle oder auch Direktverbindung verstanden werden. Eine Voraussetzung für die kollektive Nutzung ist eine digitale Plattform, die die Fahrtwünsche bündelt. In der Schweiz gibt es dazu bereits einige Pilotversuche von Postauto und mit mybuxi auch ein planmässiges Angebot (vgl. PostAuto 2021, Mybuxi 2022). Durch das Bundesamt für Verkehr werden die Rahmenbedingungen für solche Angebote hinsichtlich Zulassung und Finanzierung aktuell überarbeitet.

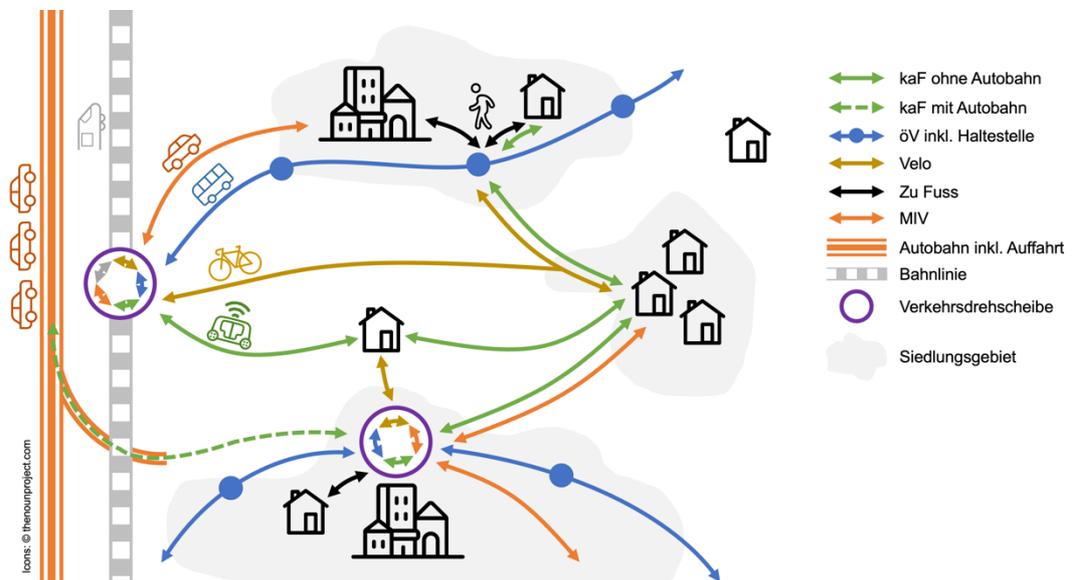


Abb. 6 Illustration der Angebotsformen

Zusätzlich zur Angebotsform auf der letzten Meile wird auch kollektives automatisiertes Fahren auf der Autobahn (grün gestrichelt) betrachtet, auf der aufgrund der technischen Bedingungen früh automatisiertes Fahren möglich sein wird. Für die Nutzenden wären beide Angebotsformen als Gesamtsystem erfahrbar, das durch digitale Plattformen zugänglich wäre (Mobility as a Service). Das Fahren auf der Autobahn unterscheidet sich vor allem durch die zugrundeliegende Geschwindigkeit vom Fahren auf der letzten Meile. Die Autobahn wird auch heute schon in Einzelfällen in das ÖV-Angebot integriert. Einer intensiveren Nutzung der Autobahn steht unter anderem die mangelnde Zuverlässigkeit

aufgrund Überlastung der Autobahnen entgegen. Mindestens zu Beginn der Mischverkehrsphase ist ohne spezifische Massnahmen zur Priorisierung von kaF noch keine Verbesserung dieser Situation zu erwarten.

Nachfolgende Abbildung und Tabelle beschreibt die beiden Angebotsformen und die gebildeten Varianten.

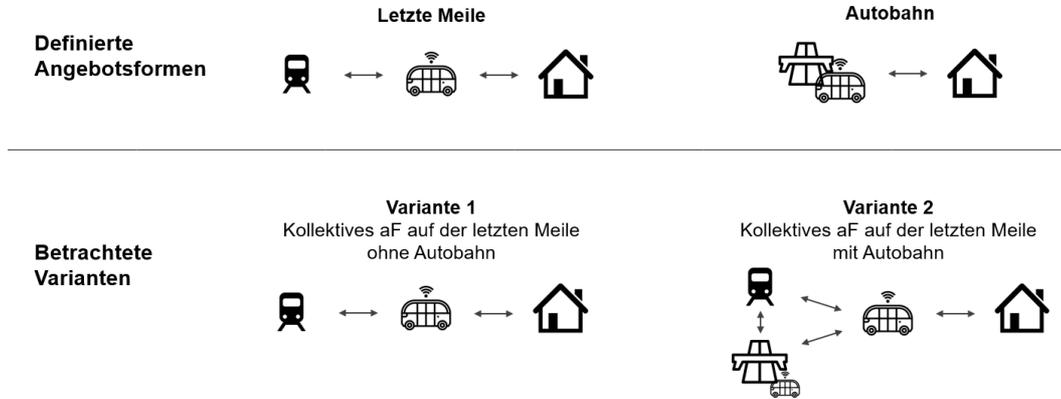


Abb. 7 Angebotsformen «kollektives automatisiertes Fahren auf der letzten Meile» (kaF-letzte Meile) und «kollektives automatisiertes Fahren auf der Autobahn» (kaF-Autobahn) und gebildete Varianten

Tab. 1 Definition der betrachteten Varianten

	Kollektives aF auf der letzten Meile ohne Autobahn	Kollektives aF auf der letzten Meile mit Autobahn
Betrieb auf letzter Meile	ja	ja
Betrieb auf Autobahn	nein	ja
Betriebszweck	aF wird eingesetzt, um die Zugänglichkeit zum bestehenden ÖV-Netz zu verbessern.	Durch die Nutzung der Autobahn entsteht neben der Verbesserung der Zugänglichkeit zum ÖV-System ein neues Angebot im bestehenden HLS-Netz, das das ÖV-Netz vor allem auch überörtlich ergänzt.
aF-Betriebsnetz	gesamtes RZU-Gebiet mit Ausnahme der Autobahnen sowie Strassenabschnitten mit aF-Befahrbarkeit < 0,625	gesamtes RZU-Gebiet inkl. der Autobahnen, mit Ausnahme von Strassenabschnitten mit aF-Befahrbarkeit < 0,625
Modus	«Tür zu Tür» bzw. «Tür zu ÖV-Station» und umgekehrt	«Tür zu Tür» bzw. «Tür zu ÖV-Station» und umgekehrt
Haltestellen	Virtuelle Haltestellen im Abstand von ca. 100 Meter (Zustieg) bzw. 200m (Ausstieg)	Virtuelle Haltestellen im Abstand von ca. 100 Meter (Zustieg) bzw. 200m (Ausstieg)
Betriebsdauer bzw. Betriebszeiten	Entspricht ÖV-Bedienzeiten	Entspricht ÖV-Bedienzeiten
Gefässgrösse	Nicht definiert	Nicht definiert
Betriebsgeschwindigkeit	Variiert nach aF-Befahrbarkeit	Variiert nach aF-Befahrbarkeit, Autobahn 70 km/h
Kosten und Tarife	Nicht definiert	Nicht definiert

Besonders zu berücksichtigen ist die für die Studie relevante Phase des Mischverkehrs. Darin werden automatisierte Fahrzeuge gleichzeitig mit konventionellen Fahrzeugen unterwegs sein und damit wäre jeweils nur in Teilgebieten und für einen über die Zeit steigenden Anteil des Personenverkehrs ein Ersatz oder eine Ergänzung durch automatisierte Fahrzeuge relevant.

2 Fallbeispiel RZU-Gebiet

2.1 Das RZU-Gebiet als Untersuchungsraum

Die räumlichen Auswirkungen des automatisierten Fahrens werden exemplarisch anhand eines Fallbeispiels untersucht. Die Untersuchungseinheit stellt dabei das RZU-Gebiet dar. Das Gebiet umfasst den grössten Teil des Kanton Zürichs und bildet den Kern des Metropolitanraums Zürich (Abb. 8).



Abb. 8 Perimeter RZU (Quelle Plangrundlage: geo.admin.ch)

Lage und Topografie

Das RZU-Gebiet als Teil des Kanton Zürichs umschliesst auf östlicher Seite den grössten Teil des Zürichsees. Südlich und westlich reicht das Gebiet bis an die Kantonsgrenze, im Osten bis Uster und im Norden etwa bis zum Zürcher Flughafen. Die Stadt Zürich am Kopf des Sees liegt dabei im Zentrum des Gebietes, umschlossen von den anderen angrenzenden Zürcher Planungsgruppen Furtal (ZPF), Glattal (ZPG), Knonaueramt (ZPK), Limmattal (ZPL), Pfannenstil (ZPP) und Zimmerberg (ZPZ). An beiden Seeufern führen Hanglagen zu den parallelen Hügelketten hinauf. Das Stadtgebiet hingegen ist in seinem Zentrum flach, verfügt aber über ausgeprägte Hanglagen. Das RZU-Gebiet ist im Forschungsprozess die Betrachtungseinheit auf der Makro-Ebene. Die anderen Betrachtungsebenen sind heterogener in ihrer Beschaffenheit. Zur Einordnung bzgl. der Verortung und Eigenschaften folgt die Definierung der Gebietstypen in 2.3.

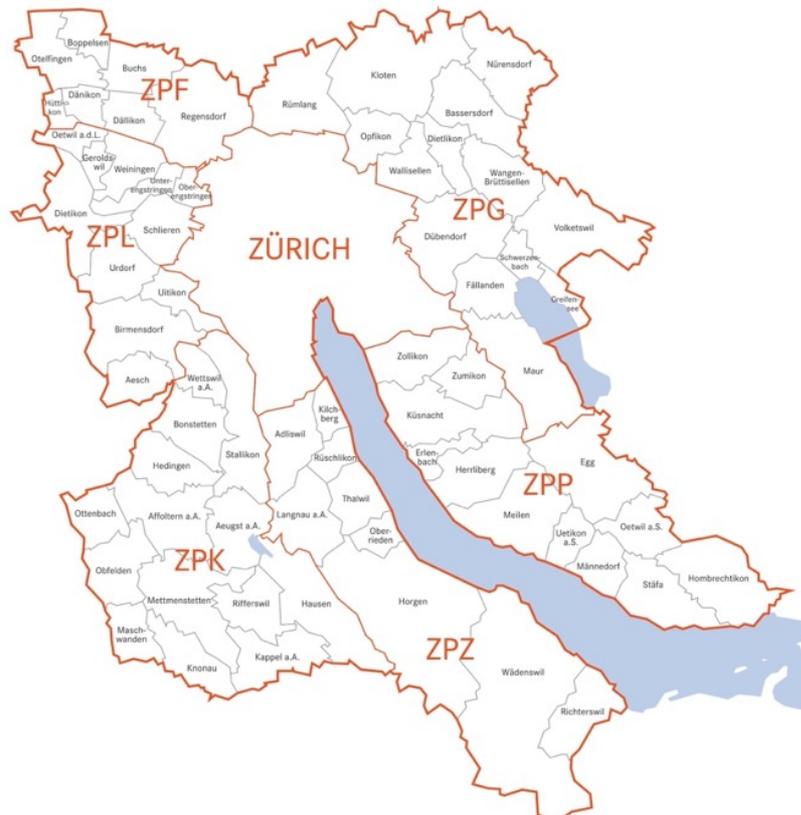


Abb. 9 Zuordnung der Gemeinden in Planungsregionen (Quelle: RZU 2019)

Bevölkerung und Dichte

Im RZU-Gebiet leben auf einer Fläche von etwa 2% der Gesamtschweiz eine knappe Million Einwohner:innen – etwa 12% der Schweizer Gesamtbevölkerung. Gleichzeitig sind etwa 16% der Schweizer Arbeitsplätze im RZU-Gebiet verortet (vgl. RZU 2018). Es wird auch in den nächsten Jahrzehnten eine hohe Zuwanderung aus anderen Kantonen und Ländern erwartet, bis 2050 könnte die Bevölkerung im RZU-Gebiet auf 1,3 Millionen Menschen steigen. Die Bevölkerungsdichte ist sehr ungleich verteilt. Während sie im gesamten Kanton im Schnitt bei 9.4 Einwohner:innen pro Hektar liegt, ist die Stadt Zürich bei 47.5 (vgl. Statistik Stadt Zürich, BVS; Statistik Stadt Zürich, GWZ und Statista 2022) und steht damit im grossen Unterschied zu den ländlichen Gebieten und den dörflichen Gemeinden. Dazwischen stellen die grossräumigen Agglomerationsgebiete einen Übergangsraum dar.

Verkehr

Durch das erwartete Bevölkerungswachstum wird auch die Verkehrsleistung stark ansteigen. Die grössten Verkehrsströme bestehen zwischen der Stadt Zürich und den Regionen Glattal, Zimmerberg und Limmattal sowie überkantonale zwischen dem Kanton Zürich und dem Aargau. Verdichtende Innenentwicklung kann zur Verringerung der Verkehrsleistung beitragen. In weniger dicht besiedelten Gebieten ist die Tagesdistanz pro Einwohner:in höher als in dicht besiedelten Gebieten. In diesen ist dazu auch der ÖV-Anteil höher.

Wirtschaft und Sozialökonomie

Wirtschaftlich betrachtet kommt dem RZU-Raum in der Schweiz eine grosse Bedeutung zu. Ein Sechstel der Schweizer Arbeitnehmer erwirtschaftet hier einen grossen Teil des nationalen Bruttoinlandsprodukts (vgl. RZU 2018). Etwa die Hälfte der Beschäftigten sind

dabei in der Stadt Zürich verortet. Der Anteil der Zupendler betrug im Jahr 2018 etwa 1 zu 1.5 (vgl. Kanton Zürich 2018).

Die Gebiete mit der höchsten Steuerkraft pro Kopf befinden sich in der oberen Region Pfannenstil am rechten Seeufer, danach kommen die obere Region Zimmerberg am linken Seeufer, die Stadt Zürich sowie das Gemeindegebiete Kloten und Uitikon (vgl. Kanton Zürich 2022b).

2.2 Raumplanerische und verkehrliche Zielsetzungen

Als Grundlage für die Auseinandersetzung mit der möglichen Umsetzbarkeit von automatisiertem Fahren müssen die raumplanerischen und verkehrlichen Zielsetzungen herangezogen werden. Bund, Kanton und Gemeinden haben sich Ziele gesteckt, in welche Richtung die Entwicklung der Region gelenkt werden soll. Für dieses Forschungsprojekt stehen dabei neben grundlegenden Raumentwicklungen insbesondere die verkehrsplanerischen Rahmenbedingungen im Vordergrund. Der Verkehr muss dabei insgesamt stärker mit der Raumentwicklung zusammengedacht werden.

Die unten folgenden Zielstellungen stammen aus vielen verschiedenen Quellen, die von Bund, Kanton oder Gemeinden aufgestellt wurden. Tab. 2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Dokumente mit den zugehörigen Perimetern. Während das Verfassen der Zielsetzungen klar einer Ebene zugeordnet werden können, sind deren Auswirkungen auf allen Ebenen zu berücksichtigen. Die nachfolgende Erläuterung geht von der Makroebene Richtung Meso- und Mikroebene. Eine eigentliche Trennung der Zielsetzungen nach den Ebenen ist aufgrund ihrer Kongruenz nicht zielführend.

Tab. 2 Quellen Zielsetzungen

Quelle	Herausgeber	Perimeter
Raumkonzept Schweiz	Bund	Handlungsräume (u.a. Metropolitanraum Zürich)
Sachplan Verkehr	Bund	Handlungsräume (u.a. Metropolitanraum Zürich)
Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050	Bund	Bund
Kantonaler Richtplan	Kanton Zürich	Kanton Zürich
Agglomerationsprogramm	Kanton Zürich	Wachstumsgebiete (Limmattal, Zürich-Glattal, Züricher Oberland, Winterthur)
Gesamtverkehrskonzept	Kanton Zürich	Kanton Zürich
Regionaler Richtplan Inkl. regionaler Raumordnungskonzepte	Regionen im Kanton Zürich	Jeweilige Regionsgrenzen

Ziele nach Handlungsräumen

Das RZU-Gebiet ist gemäss kantonalem Raumkonzept aufgeteilt in verschiedene Handlungsräume (siehe Abb. 10). Bei der Unterteilung sind die angestrebte Dynamik bezüglich des Wachstums in den Bereichen Wohnen und Arbeiten sowie die angestrebte Qualitätsverbesserungen und Aufwertungsmassnahmen ausschlaggebend. Diese gliedern sich einmal in urbane Handlungsräume (Stadtlandschaft, urbaner Wohnlandschaft), die den Grossraum der Stadt Zürich, das Limmattal, die Region Richtung Wallisellen und Uster sowie das Seeufer betreffen, sowie in ländliche Handlungsräume (Landschaft unter Druck, Kulturlandschaft, Naturlandschaft). Je nach Handlungsraum werden unterschiedliche Entwicklungsziele verfolgt. Das erwartete Bevölkerungswachstum soll zu 80% in die urbanen Handlungsräume gelenkt werden (Innenentwicklung). Damit einhergehend soll die öV-Anbindung auch in diesen Gebieten besonders ausgebaut werden, wohingegen das

Niveau in den ländlichen Räumen auf dem Stand gehalten werden soll (vgl. Kanton Zürich: Raumplanungsbericht).

Stadtlandschaften zeichnen sich durch eine sehr hohe Nutzungsdichte und Entwicklungsdynamik aus, sie beinhalten Arbeitsplatzschwerpunkte und haben eine breite Auswahl an Versorgungs-, Bildungs- und Kultureinrichtungen. *Urbane Wohnlandschaften* hingegen sollen sich nur massvoll entwickeln, sie haben auch eine regionale Zentrumsfunktion, die Mehrzahl der Arbeitnehmer:innen pendeln in die nahegelegenen *Stadtlandschaften*. Übergehend vom städtisch geprägten Bereich in die ländlichen Regionen befindet sich die *Landschaft unter Druck*. Hier stehen sich verschiedene Ansprüche an den Raum gegenüber: Landwirtschaftsflächen, Freizeit- und Erholungsraum und Infrastrukturstandorte. Aufgrund der Nähe zu urbanen Gebieten findet ein hohes Bevölkerungswachstum statt, der Flächenverbrauch muss begrenzt sein, damit die Landschaft erhalten bleibt. Die *Kulturlandschaft* zeichnet sich durch kleine Siedlungen aus, die gestreut oder kompakt in der Landschaft liegen. Die Landschaft sowie die gesamte Raumstruktur sind traditionell durch die Landwirtschaft geprägt. Durch deren Rückgang gibt es heute viele brachliegende Gebäude. Durch die weite Entfernung zu urbanen Gebieten ist der MIV vorherrschend, die ÖV-Erschliessungsqualität gering. Die Gebiete, die sich durch zusammenhängende Landschaften und Topografie auszeichnen, gehören zur *Naturlandschaft*. Hier steht der Schutz der landschaftlichen Qualität in Vereinbarkeit mit Landwirtschaft und Erholungsansprüchen im Vordergrund. Bauen ausserhalb der Bauzone soll vermieden werden (vgl. Kanton Zürich 2022, Kantonaler Richtplan)

Neben diesen Kategorien wurden kantonale Zentrumsgebiete bestimmt, acht hiervon liegen im RZU-Gebiet: Zürich-Innenstadt, Zürich-Nord, Wallisellen-Zürich/Dübendorf, Kloten-Opfikon, Dietikon, Schlieren, Zürich-Hard/Altstetten.

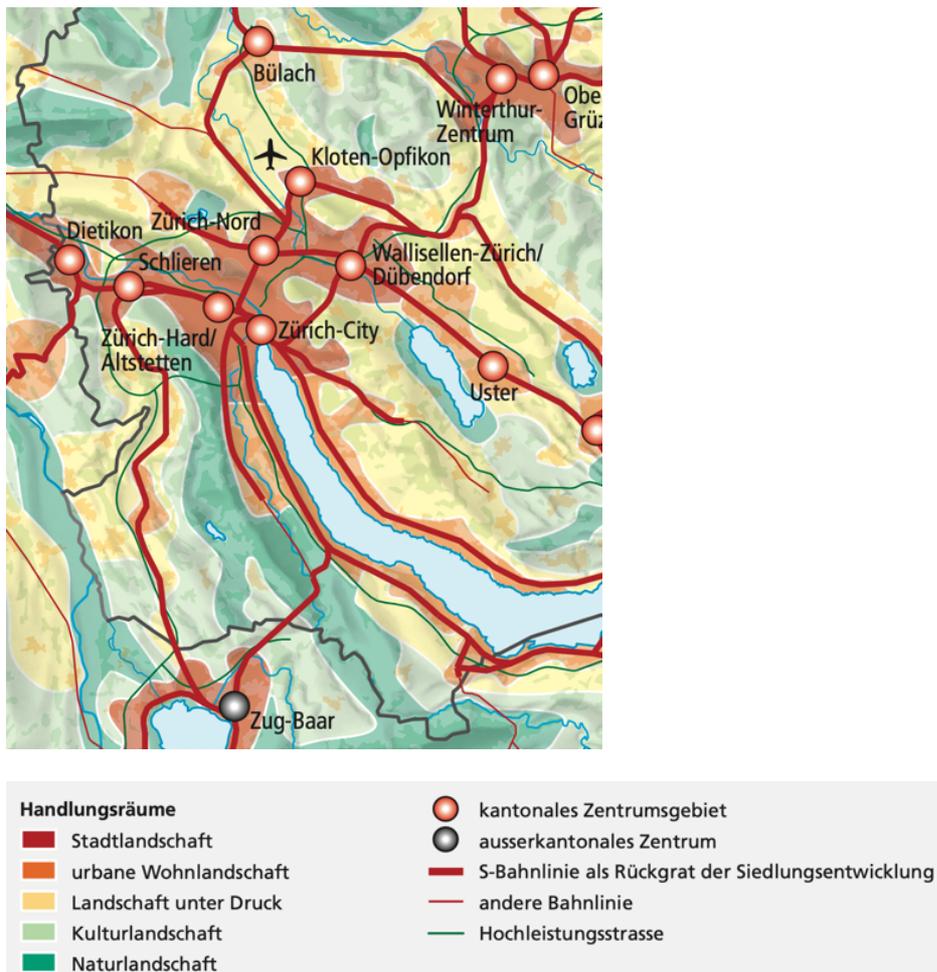


Abb. 10 Handlungsräume nach Raumplanungsbericht (2022), Kanton Zürich

Abgrenzung Siedlungsgebiet und Bauzone

Grundsätzlich ist die Siedlungsentwicklung auf das Siedlungsgebiet bzw. noch enger die Bauzone beschränkt. Das Siedlungsgebiet beschreibt das im kantonalen Richtplan festgelegte Gebiet, für das Bebauung prinzipiell möglich ist und für das keine Anpassungen vorgesehen sind. Jedoch ist nur der Teil des Siedlungsgebietes, der auch eingezont ist (Bauzone) aktuell für die Bebauung vorgesehen. Für das Bauen im Landwirtschaftsgebiet bzw. «Bauen ausserhalb der Bauzone» gelten strikte und einschränkende Vorgaben für Ausnahmefälle.

Schutz der Siedlungsgebiete bei steigender Verkehrsleistung

Eine der Herausforderungen ist dabei das enorme Verkehrsaufkommen in der Region Zürich. Der überregionale Verkehr sowie der regionale Durchgangsverkehr sollen auf die Hauptachsen und Nationalstrassen gelenkt werden und nicht auf untergeordnete Netze. Dadurch werden die Siedlungsgebiete entlastet und eine höhere Aufenthaltsqualität für die Anwohner:innen gewährleistet. Auch die Ortszentren und -durchfahrten sollen durch siedlungsorientierte Strassenraumgestaltung attraktiver gestaltet werden. Unerwünschte Einwirkungen der Verkehrsinfrastrukturen auf die Wohngebiete sollen vermieden, begrenzt und vermindert werden (vgl. Kanton Zürich 2018).

Besonders in Entwicklungsgebieten sollen massgeschneiderte Transportsysteme zum Einsatz kommen, die das Verkehrssystem strukturieren.

Schutz von Flächen und Natur

Um ressourcen- und flächenschonend vorzugehen, soll die Siedlungsentwicklung nach Innen fokussiert werden. Dabei steht im Vordergrund, die Landschaft und Umwelt nicht weiter zu belasten und zu zerstören. Der Grad der Versiegelung soll nicht weiter ansteigen. Zum Schutz von Umwelt und Natur gehört auch, dass die Trennwirkung durch Verkehrswege möglichst geringgehalten wird, Grünflächen also vernetzt bleiben und werden. Ausserdem sind sämtliche Immissionen zu minimieren. Flächeneffizienter Verkehr soll nachhaltig geplant sein und eine Ausgewogenheit zwischen Natur und urbanen Räumen widerspiegeln.

Verschiebung des Modalsplit durch Stärkung des ÖV

Das gesamte Verkehrssystem soll in Zukunft weniger für den MIV ausgebaut werden, sondern der ÖV sowie Fuss- und Veloverkehr gestärkt werden. Damit soll vor allem auch der Anteil des MIV im Modalsplit gesenkt werden (vgl. Kanton Zürich 2018). Besonders die ÖV-Erschliessung im Sinne einer Stärkung der Nebenzentren ist in der Agglomeration und in den Gebieten mit planerisch gewollter Entwicklung zu verbessern. In den übrigen Gebieten soll die Erschliessungsqualität mit MIV und ÖV gehalten, jedoch durch den Fuss- und Veloverkehr verbessert werden.

2.3 Gebietstypen

Der Einsatz automatisierter Fahrzeuge hat je nach Funktion eines Gebiets unterschiedliche Auswirkungen auf die Angebotsform, aber auch auf die räumliche Entwicklung dieses Gebiets. Um die verschiedenen Auswirkungen des automatisierten Fahrens zu untersuchen, wurden im Zuge des Forschungsprojektes Gebietstypen erstellt, die die Heterogenität des RZU-Funktionalraums und ihre Planungsregionen abbilden sollen. Sie sollen exemplarisch herangezogen werden, um kleinräumige Auswirkungen in unterschiedlichen Räumen beurteilen zu können. Denn eine flächendeckende Überprüfung auf dieser Ebene ist nicht möglich. Gleichzeitig soll auch die Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf andere Agglomerationen sichergestellt werden. Die Beispiele der jeweiligen Gebietstypen unterscheiden sich in einigen Parametern untereinander und stehen beispielsweise auch für Gebiete, die transformiert werden sollen und solche, für die planerisch keine Veränderung vorgesehen ist.

2.3.1 Methodik und Datengrundlage

Die Gebietstypen dienen der räumlich-differenzierten Analyse der Auswirkungen von aF und bilden das Fallbeispiel RZU-Gebiet ab. Es wurde darauf geachtet, dass alle Regionen der RZU in den näher zu analysierenden Beispielen abgedeckt sind. Die Schlussfolgerungen für diese Gebietstypen sind auf andere Agglomerationen in der Schweiz übertragbar, jedoch nicht auf ländlichere Räume.

Die Beschreibungen der Gebietstypen basieren auf quantitativen und räumlichen Analysen der Daten aus den Gemeindeporträts des Kantons Zürich sowie der Quartieranalyse des Statistischen Amtes des Kantons Zürich (Stand 27.04.2020). Die Gebietstypen sollen helfen, Vergleichbarkeit zu generieren und spiegeln die grossteils raumplanerischen Gegebenheiten. Die quantitative Herangehensweise soll dabei keine statistische Exaktheit darstellen, sondern dient lediglich als Hilfe für eine Annäherung. Eine qualitative Beschreibung der Ortschaften ergänzt die Herleitung der Gebietstypen.

Um die korrekte Eingrenzung und Verortung sicherzustellen wurde das Konzept der Gebietstypen sowie die ausgewählten Beispiele mit Vertretern von Kanton, Stadt und Regionen validiert.

Im Folgenden werden die sechs Gebietstypen beschrieben. Die Kategorisierung der Gebietstypen basiert auf mehreren Parametern, mit denen sowohl räumliche als auch verkehrliche Charakteristika abgebildet werden sollen. Als wichtiges Kriterium für die aF-Befahrbarkeit wurde die vorhandene Verkehrsinfrastruktur betrachtet, und damit festgehalten, ob das Gebiet hauptsächlich durch den MIV oder den ÖV angebunden ist. In den meisten Gebieten bestehen beide Anbindungsoptionen, allerdings wurde entsprechend des jeweiligen Hauptfokus' kategorisiert. Als weitere Unterscheidungskriterien wurde die Zentralität ergänzt (dörflich, peripheres Zentrum oder (Innen-)Stadt) bzw. die Nutzung des Gebiets in Industrie- und Gewerbegebiete, Arbeits-/Wohngebiete unterteilt.

Folgende Gebietstypen wurden bestimmt (siehe Abb. 11):

1. Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss
2. Peripheres Zentrumsgebiet
3. Dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss
4. Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss
5. Dörfliches Gebiet mit Bahnanschluss
6. Dörfliches Gebiet mit MIV-Orientierung
7. Innenstadt Zürich

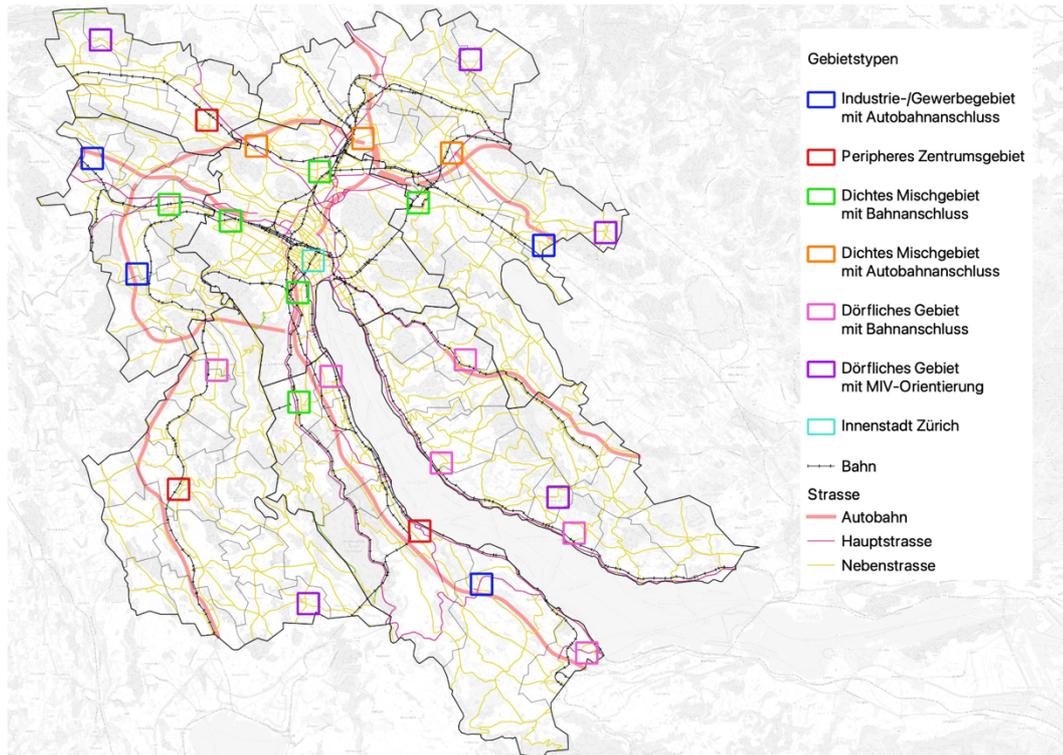


Abb. 11 Übersicht über die Gebietstypen

Die Dimension der Gebiete ist ein Ortsteil oder ein grösseres Quartier von zirka 1 Quadratkilometer (Bearbeitungsperimeter). Durch den gleichen Massstab können die Beispiele der Gebietstypen besser vergleichbar dargestellt werden, der Massstab erschliesst sich dem Betrachter und die Abgrenzung ist einheitlich geregelt.

Für die Anzahl der Einwohner*innen und Beschäftigten sowie die Nutzungsdichte im Bearbeitungsperimeter jedes Beispiels wurden die Parzellen mitgezählt, welche mehrheitlich im Bearbeitungsperimeter liegen. Andere Daten mussten auf Gemeindeebene angegeben werden.

Im Folgenden werden die Gebietstypen kurz charakterisiert und Beispiele verortet. Ausführliche Erläuterungen und eine Karte mit den Bezeichnungen der Gebietstypenbeispiele enthält Anhang I (als separate Datei verfügbar auf <https://www.mobilityplatform.ch/>).

2.3.2 Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss

Der Gebietstyp «Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss» zeichnet sich durch die Nutzung als Gewerbe- und Industriegebiet aus. Der Typ umfasst neben der Produktion auch grössere Verkaufsflächen (z.B. Einkaufszentren) oder Logistik. Das Arbeiten steht in diesen Gebietstypen im Fokus und Wohnen spielt keine oder eine sehr geringe Rolle. Die Gebiete werden vorwiegend über die Autobahn erschlossen und der öv spielt für Pendler eine untergeordnete Rolle. In einigen der Beispiele gibt es auch einen Anschluss an den Güterverkehr.

Die Beispiele hierzu sind:

- Dietikon Silber, Gemeinde Dietikon in der Planungsregion Limmattal
- Urdorf, Gemeinde Urdorf-Birmensdorf in der Planungsregion Limmattal
- Wädenswil, Gemeinde Wädenswil in der Planungsregion Zimmerberg
- Zimikon, Gemeinde Volketswil in der Planungsregion Glattal

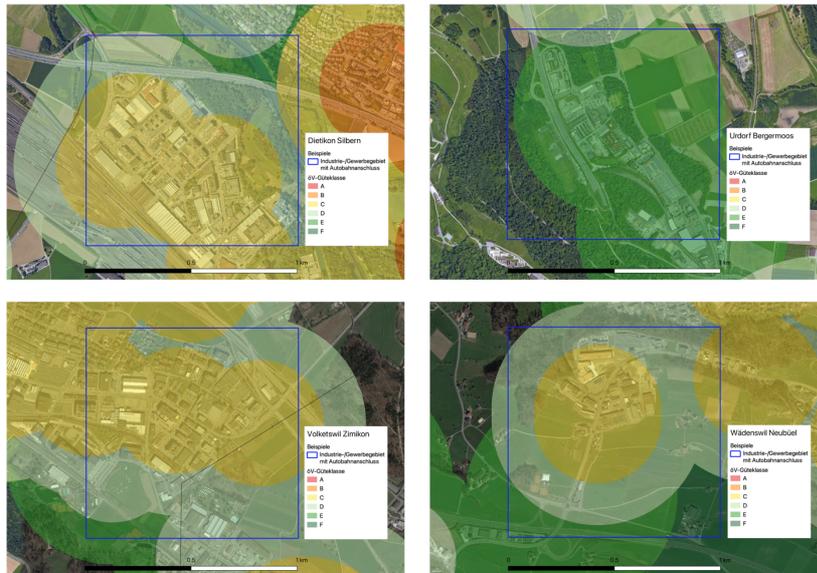


Abb. 12 ÖV-Güteklassen für Beispiele des Gebietstyps «Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss»

Übersicht der Beispiele des Gebietstyps «Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss»

Die Beispiele des Gebietstyps «Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss» sind Orte am Rande des Siedlungsgebiets mit Schwerpunkt Industrie, Handel und/oder Logistik. Das Gebiet Silbernen in Dietikon ist das grösste Gebiet der Beispiele. Deutlich kleiner sind die Gebiete in Urdorf und Wädenswil. Zudem unterscheiden sie sich in der Art der Nutzung. Urdorf ist in erster Linie ein Logistikgebiet. Wädenswil und Silbernen sind in der Nutzung gemischter. Das Gebiet hat jedoch im Vergleich zu den Beispielen im Gebietstyp «Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss» deutlich weniger Einwohner*innen und wurde deshalb hier eingeordnet.

Die Zahl der Einwohner*innen in den Bearbeitungsperimetern des Gebietstyps ist sehr gering. Die Zahl der Beschäftigten liegt meist weit über das Zehnfache der Anzahl Bewohnenden. Die Beispiele haben zwischen 4 und rund 560 Einwohner*innen und zwischen 660 und 6'000 Beschäftigte. Sie bilden Arbeitsgebiete, wo die Arbeitnehmer*innen hin pendeln – meist mit dem Auto. Die Beispiele haben alle einen direkten Autobahnanschluss im Bearbeitungsperimeter. Die öV-Güteklasse ist mässig bis schlecht (zwischen der Kategorie C-E) (siehe Abb. 12). In den entsprechenden Gemeinden liegt der Modalsplit mit einem Anteil von 83% oder mehr klar beim MIV. Die Steuerkraft pro Kopf liegt in allen Gemeinden, in denen die Beispiele liegen, unter dem Zürcher Mittelwert von CHF 4'198.-.

2.3.3 Peripheres Zentrumsgebiet

Dieser Gebietstyp ist dadurch gekennzeichnet, dass das Gebiet eine Hubfunktion für die Region hat – mit Arbeitsplätzen, Gewerbe/Detailhandel und relativ dichtem Wohnen. Die Gebiete sind dementsprechend gut erschlossen.

Die Beispiele hierzu sind:

- Affoltern am Albis, Gemeinde Affoltern am Albis in der Planungsregion Knonaueramt
- Horgen, Gemeinde Horgen in der Planungsregion Zimmerberg
- Regensdorf, Gemeinde Regensdorf in der Planungsregion Furttal

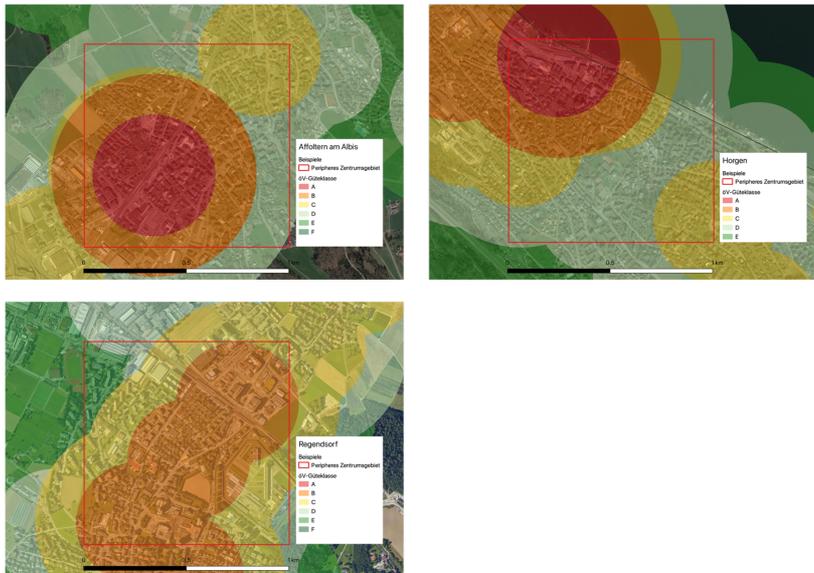


Abb. 13 ÖV-Güteklassen für Beispiele des Gebietstyps «Peripheres Zentrumsgesamt»

Übersicht der Beispiele des Gebietstyps «Peripheres Zentrumsgesamt»

Die Beispiele des Gebietstyps «Peripheres Zentrumsgesamt» sind die Ortszentren von Hub-Gemeinden für die Region. Sie haben eine relativ gute öV-Güteklasse (mindestens B) (Abb. 13). Die Beispiele haben einen S-Bahnanschluss im Bearbeitungsperimeter und befinden sich in der Nähe eines Autobahnanschlusses, auch wenn dieser nicht direkt im Bearbeitungsperimeter ist. Sie weisen zwischen 5'500-7'800 Einwohner*innen und zwischen 3'300-4'600 Beschäftigten auf. Bei allen ausser Regensdorf ist der Wohnanteil noch deutlich höher als der Beschäftigtenanteil. Dies liegt auch daran, dass im Bearbeitungsperimeter von Regensdorf ein kleiner Teil als Industrie- und Handelszone definiert ist. Die Nutzungsdichte liegt zwischen knapp 130 und 180 Personen pro Hektar. Die Steuerkraft liegt in den Beispielen ausser Horgen deutlich unter dem kantonalen Durchschnitt.

2.3.4 Dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss

Dieser Gebietstyp wird durch eine relativ hohe Nutzungsdichte und -mischung, wie auch durch eine gute öV-Erschliessung durch S-Bahn und Regionalzüge ausgewiesen.

Die Beispiele hierzu sind:

- Adliswil, Gemeinde Adliswil in der Planungsregion Zimmerberg
- Altstetten, Stadt Zürich
- Enge, Stadt Zürich
- Hochbord (Stettbach), Gemeinde Dübendorf in der Planungsregion Glattal
- Oerlikon, Stadt Zürich
- Schlieren, Gemeinde Schlieren in der Planungsregion Limmattal
- Wallisellen, Gemeinde Wallisellen in der Planungsregion Glattal



Abb. 14 ÖV-Güteklassen für Beispiele des Gebietstyps «Dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss»

Übersicht der Beispiele des Gebietstyps «Dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss»

Die Beispiele des Gebietstyps «Dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss» sind durch starke Mischnutzung, relativ hohe Nutzungsdichte und gute ÖV-Güteklasse geprägt (Abb. 14). Die Beispiele haben alle einen (S-)Bahnhof im Bearbeitungsperimeter.

Sie weisen zwischen 3'000-9'500 Einwohner*innen und zwischen knapp 4'000 und 17'000 Beschäftigte auf. Mit Ausnahme von Schlieren und Adliswil sind die Beschäftigten klar in der Überzahl. Die Nutzungsdichte liegt mit Ausnahme von Adliswil über 200 Personen pro Hektar, was im RZU-Raum zur höheren Dichtekategorie gehört. Diese Eigenschaften sind im Beispiel Oerlikon am stärksten ausgeprägt, die anderen Gebiete sind aber relativ ähnlich strukturiert.

2.3.5 Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss

Der Gebietstyp «Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss» ist durch eine hohe Nutzungsdurchmischung mit Arbeiten und Wohnen geprägt. Die Nutzungsdichte ist typisch für die urbanen Gebiete, die sich von der Stadt Zürich insbesondere Richtung Glattal, aber auch Richtung Westen ausweiten. Die Bebauung weist Wohnzonen 3 oder höher auf. Die Gebiete sind direkt mit einem Autobahnanschluss verbunden und verfügen auch über einen ÖV-Bahnanschluss.

Die Beispiele hierzu sind:

- Dietlikon, Gemeinde Dietlikon in der Planungsregion Glattal
- Neuaffoltern, Stadt Zürich
- Opfikon, Gemeinde Opfikon in der Planungsregion Glattal

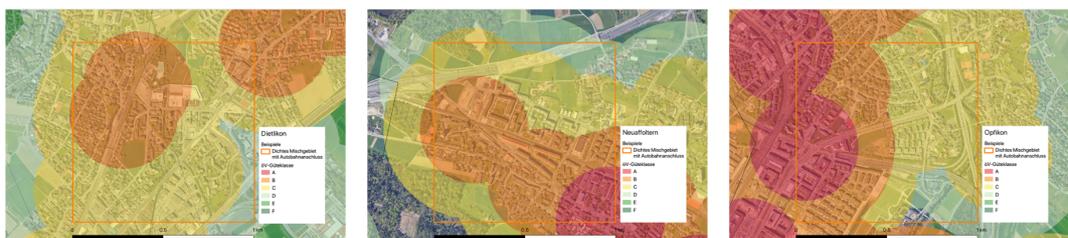


Abb. 15 ÖV-Güteklassen für Beispiele des Gebietstyps «Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss»

Übersicht der Beispiele des Gebietstyps «Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss»

Die Beispiele des Gebietstyps «Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss» sind durch ihren Mix von Wohnen und Arbeiten in einer relativ hohen Dichte geprägt. Das Beispiel Dietlikon, welches zum Teil aus einem Gewerbegebiet besteht, könnte auch in den Gebietstyp «Industrie- und Gewerbegebiet» passen, allerdings ist die Differenz zwischen der Anzahl Einwohner*innen und Beschäftigten nicht so gross wie das bei dem Gebietstyp «Industrie- und Gewerbegebiet» der Fall ist. Nur der südliche Teil des Bearbeitungsperimeter liegt in einer Industrie- und Handelszone. Der nördliche Teil ist vor allem durch Wohnen geprägt.

Sowohl die Anzahl an Bewohnenden als auch Beschäftigten liegt im Bearbeitungsperimeter über 1'000. Die Nutzungsdichte ist dementsprechend mit 100-180 Personen pro Hektar relativ hoch. Diese Dichte ist etwa gleich hoch wie im Gebietstyp «Peripheres Zentrumsgebiet» (vgl. Kapitel 2), jedoch geringer als im Gebietstyp «Dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss».

Die Beispiele haben alle sowohl einen direkten Autobahnanschluss wie auch einen S-Bahnhof im Bearbeitungsperimeter. Dementsprechend ist auch die öV-Güteklasse gut bis sehr gut (siehe Abb. 15). Die Steuerkraft pro Kopf liegt um oder deutlich über dem Zürcher Mittelwert von CHF 4'198.-.

2.3.6 Dörfliches Gebiet mit Bahnanschluss

Dieser Gebietstyp ist durch Wohnen geprägt. Das bedeutet, es gibt eine hohe Anzahl von Wegpendler*innen, aber diese verfügen über gute ÖV-Verbindungen aufgrund eines S-Bahn-Anschlusses.

Die Beispiele hierzu sind:

- Bonstetten-Wettswil, Gemeinde Bonstetten und Gemeinde Wettswil in der Planungsregion Knonaueramt
- Herrliberg, Gemeinde Herrliberg in der Planungsregion Pfannenstil
- Kilchberg, Gemeinde Kilchberg in der Planungsregion Zimmerberg
- Männedorf, Gemeinde Männedorf in der Planungsregion Pfannenstil
- Richterswil, Gemeinde Richterswil in der Planungsregion Zimmerberg
- Zumikon, Gemeinde Zumikon in der Planungsregion Pfannenstil



Abb. 16 ÖV-Güteklassen für Beispiele des Gebietstyps «Dörfliches Gebiet mit Bahnanschluss»

Übersicht der Beispiele des Gebietstyps «Dörfliches Gebiet mit Bahnanschluss»

Die Beispiele des Gebietstyps «Dörfliches Gebiet mit Bahnanschluss» sind Orte, welche den Schwerpunkt beim Wohnen haben. Die Zahl der Bewohnenden im Bearbeitungsperimeter ist deutlich höher als die Zahl der Beschäftigten. Die Beispiele haben zwischen 2'500 und 6'000 Einwohner*innen und zwischen 400 und 1'700 Beschäftigte. Es gibt zwar ein Zentrum mit guter Versorgung für den täglichen Gebrauch, aber die meisten Einwohner*innen pendeln für die Arbeit in grössere Zentren (z.B. nach Zürich oder Zug).

Die Beispiele besitzen alle einen (S-)Bahnhof im Bearbeitungsperimeter. Auch die öV-Güteklasse ist mit zwischen B und D relativ gut (siehe Abb. 16). Trotzdem liegt der Bimodalsplit bei zirka 80% MIV und 20% öV. Die Steuerkraft pro Kopf unterscheidet sich in den Gemeinden stark. Dies hängt auch mit der Lage der Gemeinden zusammen. Zumikon und Kilchberg sind beide sehr nahe bei der Stadt, aber in einer der Seeregionen gelegen. Zumikon ist ein Teil vom Pfannenstil (auch Goldküste genannt) und Kilchberg ist ein Teil der Region Zimmerberg. Die beiden Beispiele Männedorf und Richterswil sind zwar ebenfalls in diesen Regionen angesiedelt, aber beide deutlich weiter von der Stadt Zürich entfernt.

2.3.7 Dörfliches Gebiet mit MIV-Orientierung

Dieser Gebietstyp ist durch einen dörflichen und eher abgelegenen Charakter gekennzeichnet. Die öV-Erschliessung ist dadurch eher gering, bzw. die Bewohnenden sind in erster Linie auf den MIV angewiesen.

Die Beispiele hierzu sind:

- Kappel am Albis, Gemeinde Kappel am Albis in der Planungsregion Knonaueramt
- Birchwil, Gemeinde Nürensdorf in der Planungsregion Glattal
- Boppelsen, Gemeinde Boppelsen in der Planungsregion Furttal
- Gutenswil, Gemeinde Volketswil in der Planungsregion Glattal
- Uetikon am See, Gemeinde Uetikon am See in der Planungsregion Pfannenstil



Abb. 17 öV-Güteklassen für Beispiele des Gebietstyps «Dörfliches Gebiet mit MIV-Orientierung»

Neben diesen ausgewählten Beispielen gibt es aber noch einige Orte mehr, z.B. Aesch, Fällanden, Obfelden, Hombrechtikon, Nürensdorf, Oetwil am See, die diesem Typ entsprechen.

Übersicht der Beispiele des Gebietstyps «Dörfliches Gebiet mit MIV-Orientierung»

Die Beispiele des Gebietstyps «Dörfliches Gebiet mit MIV-Orientierung» umfassen Dörfer oder Ortsteile von Gemeinden, welche weder einen direkten Autobahn- noch Bahnanschluss haben und in einer unteren ÖV-Güteklasse sind (siehe Abb. 17). Es sind Wohnorte mit 1-2 Geschossen und einer relativ geringen Nutzungsdichte. Die Beispiele haben zwischen rund 500-2'000 Einwohner*innen und um die 100-200 Beschäftigte. Je nach Region ist die Steuerkraft sehr unterschiedlich.

2.3.8 Innenstadt Zürich

Die Innenstadt Zürich ist mit dem restlichen RZU-Raum kaum vergleichbar. Das zeigt sich an der Nutzungsdichte, aber auch an der ÖV-Güteklasse (siehe Abb. 18). Die Innenstadt Zürich ist aber auch deswegen speziell, weil sie durch ihren Status im Bundesinventar ISOS der geschützten Ortsbilder veränderungsresistent ist. Nichtsdestotrotz wird sich auch die Innenstadt Zürich verändern, sei es durch Trends wie Online-Shopping, Homeoffice oder neue Wirtschaftszweige oder durch Veränderungen des Büroflächenbedarfs. Aus diesem Grund soll auch die Innenstadt Zürich am Beispiel der Bahnhofstrasse und ihres Umfeldes untersucht werden.

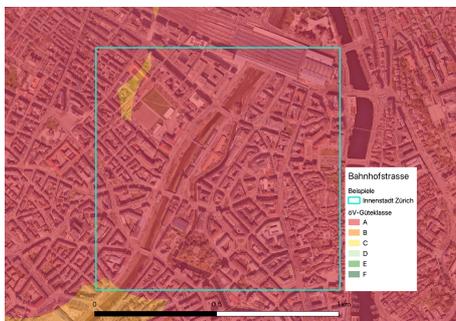


Abb. 18 ÖV-Güteklassen für den Gebietstyp «Innenstadt Zürich»

3 Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge

3.1 Einleitung und Stand der Forschung

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, wird aktuell von Expert:innen von einer längeren Übergangszeit ausgegangen, in welcher automatisierte, fahrerlose Fahrzeuge nicht in allen, sondern aufgrund der Komplexität der Einsatzumgebung nur in Teilbereichen des Strassennetzes eingesetzt werden können – man spricht dabei von Level 4-Fahrzeugen.

Blickt man auf die Einsatzgebiete heutiger Anwendungsfälle von automatisierten Level 4-Fahrzeugen, wie beispielsweise automatisierte Shuttles, oder Robotaxis von Cruise oder Waymo in San Francisco, USA, so erkennt man, dass auch diese nur auf bestimmten Strassen bzw. in bestimmten, abgetrennten aF-Betriebsgebieten unterwegs sind (vgl. Abb. 19).

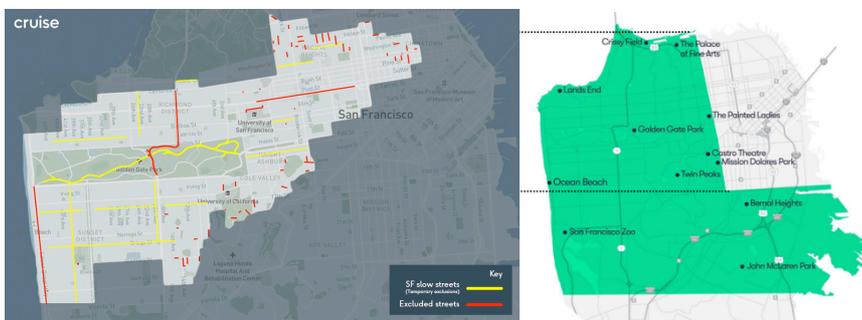


Abb. 19 aF-Betriebsgebiete von GM Cruise (links) und Waymo (rechts) in San Francisco, USA – Stand Oktober 2021 (Quelle: GM Cruise 2021: 7, Amadeo 2021).

Die Abgrenzung von Gebieten, d.h. das nicht ubiquitäre Fahren von Level 4-Fahrzeugen, ergibt sich insbesondere aus der Komplexität der Befahrbarkeit unterschiedlicher Einsatzumgebungen bzw. Strassenräume. Automatisierte Fahrzeuge müssen mittels Sensoren ihr Umfeld erfassen, die erfassten Daten verstehen und anhand dieser Daten eine Fahrentscheidung treffen. Unterschiedliche Einsatzumgebungen können diese zur Erledigung der Fahraufgabe durchzuführenden Aufgaben jedoch erschweren. Auch Protokolle von Tests mit automatisierten Fahrsystemen, insbesondere die sogenannten Disengagement Reports von Unternehmen, die für das California Department of Motor Vehicles (vgl. DMV 2022) zur Verfügung gestellt werden müssen, zeigen, dass es systematische Schwierigkeiten für automatisierte Fahrsysteme aktueller Bauart gibt (vgl. Fávoro et al. 2018, Boggs et al. 2020a).

Aufbauend auf diesen Überlegungen wurde in Soteropoulos et al. (2020) ein Ansatz entwickelt, mit dem anhand von verschiedenen Faktoren bzw. Indikatoren – die letztlich die Komplexität von Strassenräumen für automatisierte Fahrzeuge abbilden – eine Bewertung von einzelnen Teilen des Strassennetzes vorgenommen werden kann, welche Teile davon aus technisch-infrastruktureller Sicht besser bzw. schlechter mit automatisierten Fahrzeugen befahren werden können. Dieser Bewertungsansatz fokussiert allein auf die technisch-infrastrukturelle Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge (aF-Befahrbarkeit) und zeigt auf, auf welchen Strassen automatisierte Fahrzeuge besser oder weniger gut fahren können. Es erfolgt jedoch keine Beurteilung zur Eignung der Strassenräume für eine Nutzung durch automatisierte Fahrzeuge (wofür auch andere Aspekte, wie z.B. die strassenräumliche Verträglichkeit (siehe Kapitel 5.2.6) eine Rolle spielen). Dieser Ansatz wurde nun für die Bewertung des Strassennetzes im RZU-Gebiet weiterentwickelt.

Diese Bewertung der aF-Befahrbarkeit ist ein generischer Ansatz. Das bedeutet hier werden nicht spezifische Faktoren, die die Komplexität für bestimmte automatisierte

Fahrzeuge (beispielsweise spezifischer Hersteller) erhöhen, betrachtet, sondern generisch Faktoren zusammengefasst, die die Komplexität einer Fahraufgabe für automatisierte Fahrzeuge erhöhen. Der Ansatz eignet sich als Planungsgrundlage, jedoch nicht für den Einsatz oder die Routenplanung von automatisierten Fahrzeugen. Für letzteres wird an dieser Stelle an alternative Methoden wie die Analyse und das Mapping von Disengagements durch den realen Einsatz von automatisierten Fahrzeugen wie in Christensen et al. (2021) oder Ramanagopal et al. (2018) verwiesen.

Der Vorteil der hier angewendeten GIS-basierten Bewertung der aF-Befahrbarkeit anhand der Ableitung verschiedener Indikatoren liegt darin, dass grössere Strassennetze schnell und auf Basis von meist bei lokalen Behörden existierenden Daten bewertet und dargestellt werden können. Dies ermöglicht einerseits einen raschen, jedoch differenzierten Überblick für Planende und lokale Behörden hinsichtlich der Befahrbarkeit des Strassennetzes durch automatisierte Fahrzeuge und andererseits eine differenzierte Berücksichtigung dessen, wo automatisierte Fahrzeuge zukünftig eher bzw. mit weniger Aufwand eingesetzt werden, die in planerischen Überlegungen berücksichtigt werden können.

3.2 Methodik

3.2.1 Framework für die Bewertung der Befahrbarkeit von Strassennetzen für automatisierte Fahrzeuge

Auf Basis der in der Literatur und Testberichten beschriebenen Faktoren sowie im Zusammenhang mit den wesentlichen Aufgaben automatisierter Fahrsysteme wurde in Soteropoulos et al. (2020) ein Framework für die Bewertung der Befahrbarkeit des Strassennetzes mit automatisierten Fahrzeugen entwickelt. Der Ansatz geht davon aus, dass Prozesse wie 1) die Umfelderkennung und -abbildung, 2) die Planung und das Treffen einer entsprechenden Fahrentscheidung sowie 3) die Ausführung der entsprechenden Fahrentscheidung, welche für das Ausführen der Fahraufgabe durch automatisierte Fahrzeuge notwendig sind, durch verschiedene Faktoren und Rahmenbedingungen erschwert werden. Hierbei wurden fünf Komponenten, die die Befahrbarkeit von Strassenräumen bzw. eines Strassensegments für automatisierte Fahrzeuge bestimmen, abgeleitet: 1) Anzahl von Objekten im Strassenraum, 2) Diversität von Objekten im Strassenraum, 3) Zustand und Konfiguration der Strasseninfrastruktur, 4) Geschwindigkeitslimit, 5) Stabilität der Operational Design Domain (vgl. Soteropoulos et al. 2020, Soteropoulos 2021).

Anzahl von Objekten im Strassenraum

Die Anzahl von Objekten im Strassenraum beschreibt das Vorhandensein von verschiedenen Objekten im Strassenraum. Es kann zwischen dynamischen Objekten (z.B. verschiedene Verkehrsteilnehmer, Tiere) und statischen Objekten (z.B. Verkehrsschilder, Ampeln, Strassenmarkierungen etc.) unterschieden werden. Hier sind vor allem dynamische Objekte problematisch, da das automatisierte Fahrsystem neben deren Erkennung und Identifikation (z.B. Klassifizierung) auch ihr zukünftiges Verhalten bestimmen und antizipieren muss – wobei dabei vor allem unerwartete, falsche oder aussergewöhnliche Verhaltensweisen (z.B. ein Fussgänger, der bei Rot über die Strasse geht), die Komplexität weiter erhöhen (vgl. Koopman & Fratrik 2019). Natürlich steigt die Komplexität für das automatisierte Fahrsystem je mehr solcher Objekte erkannt und identifiziert werden müssen und deren Verhalten bestimmt werden muss: Zum Beispiel war die Anwesenheit einer grossen Anzahl von Fussgängern eine häufige Ursache für Probleme und Zwischenfälle bei bisherigen Erprobungen mit automatisierten Fahrzeugen (vgl. Favarò, et al., 2018, Campbell et al., 2010). Darüber hinaus kann auch zwischen Objekten, die beobachtet werden müssen, und Objekten, die die Sicht versperren können, unterschieden werden: Während andere Verkehrsteilnehmer oder Ampeln vom automatisierten Fahrsystem beobachtet werden müssen, können Hindernisse im Strassenraum, wie Bäume, Büsche, geparkte Autos, Strassenlaternen, überhängende Schilder, Werbetafeln oder Schutt etc. Barrieren (physische Hindernisse) für die Wahrnehmungsaufgabe von automatisierten Fahrsystemen darstellen (vgl. International Transport Forum, 2018, Koopman & Fratrik, 2019). Auch hier steigt die Komplexität

insbesondere mit der Anzahl der Hindernisse, die die Erkennung und Identifizierung von Objekten behindern.

Diversität von Objekten im Strassenraum

Die Diversität von Objekten im Strassenraum bezieht sich auf die Heterogenität der Objekte, die vom automatisierten Fahrsystem erkannt und identifiziert werden müssen und deren Verhalten bestimmt werden muss. Dazu gehören verschiedene statische Objekte wie Verkehrsschilder, Fahrbahnmarkierungen oder Lichtsignalanlagen (z.B. Schranken), aber auch verschiedene dynamische Objekte, insbesondere Verkehrsteilnehmer wie Fussgänger, Velofahrer, Motorradfahrer, Strassenbahnen, von Menschen gesteuerte Kraftfahrzeuge (z.B. Pkw, Lkw, Busse) und andere automatisierte Fahrzeuge oder Tiere. Je grösser die Vielfalt der Objekte ist, die vom automatisierten Fahrsystem erkannt und identifiziert werden müssen, desto umfangreicher muss die Software des automatisierten Fahrsystems entwickelt sein: Während auf Autobahnen nur selten mit Velofahrern zu rechnen ist und automatisierte Fahrsysteme hier in der Regel nicht in der Lage sein müssen, deren Verhalten zu antizipieren, sind z.B. an Kreuzungen mit Velofahrstreifen Velofahrer deutlich wahrscheinlicher und es werden daher hochentwickelte automatisierte Fahrsysteme benötigt, die in der Lage sind, das (oft unvorhersehbare) Verhalten von Velofahrern zu bestimmen und vorherzusehen (vgl. Bugala, 2018, Czarnecki, 2018; Thorn et al., 2018). Dabei ist insbesondere die Vielfalt der Objekte auf der Fahrbahn, d.h. der Objekte, die sich auf der Fahrbahn befinden und möglicherweise mit dem automatisierten Fahrsystem interagieren, relevant, z.B. Velofahrer, die direkt auf der Strasse fahren (z.B. auf einem Velo- oder Mehrzweckstreifen) oder Strassenbahnen, die auf auf der Fahrbahn befindlichen Gleisen fahren. Darüber hinaus gibt es sehr unterschiedliche Verkehrszeichen (z.B. Stop, Vorfahrt gewähren), Verkehrssignale (z.B. Blinken) und Fahrbahnmarkierungen, die auch innerhalb verschiedener Regionen eines Landes variieren können (z. B. blaue Stoppschilder, grüne Velowege usw.) und die Komplexität für das automatisierte Fahrsystem weiter erhöhen, da es in der Lage sein muss, all diese Zeichen zu erkennen (vgl. Thorn et al., 2018, Koopman & Fratrik, 2019).

Zustand und Konfiguration der Strasseninfrastruktur

Der Zustand und die Konfiguration der Strasseninfrastruktur bezieht sich auf das Vorhandensein und den Zustand bzw. die Qualität der Strasseninfrastruktur, d.h. Beschilderung, Fahrbahnmarkierungen und Fahrbahnoberfläche, sowie deren Beschaffenheit, insbesondere die Beschaffenheit der Fahrbahn sowie die Konfiguration der Strasseninfrastruktur, d.h. Fahrbahntyp wie Kreuzung, Einmündungsbereich, Kreisverkehr, Tunnel, Unterführung und Fahrbahngeometrie wie Fahrbahnbreite oder Kurve und Trennung der Verkehrsträger usw. Hinsichtlich des Zustands der Strasseninfrastruktur stellen die Erkennung und Identifizierung von Fahrbahnmarkierungen in schlechtem Zustand, fehlende Leitpfosten oder Schlaglöcher und unterschiedliche Farbwerte beim Fahrbahnbelag, z.B. durch Ausbesserungen oder im Vergleich von Asphalt und Beton (Strassenzustand), usw. sowohl für die Sensoren als auch für die Software von automatisierten Systemen Probleme dar (vgl. Fellendorf, 2018, Alkim, 2018, EuroRAP, 2018). So berichten beispielsweise Lv et al. (2018), dass der Zustand der Strassenoberfläche (einschliesslich schlechter Markierungen) eine der Hauptursachen für Disengagements bei Tests mit automatisierten Fahrzeugen in den USA war (vgl. Lv et al., 2018). Hinsichtlich der Konfiguration der Strasseninfrastruktur stellen insbesondere (unsignalisierte) Kreuzungen, Weichenbereiche oder Kreisverkehre Herausforderungen dar und erhöhen die Komplexität für automatisierte Fahrsysteme, da das Verhalten des Fahrzeugs von den verschiedenen möglichen Aktionen der umliegenden Verkehrsteilnehmer abhängt und umgekehrt, was mit der Anzahl der Strahlen der Kreuzung potenziell zunimmt (vgl. Radwan et al., 2017, Transport Systems Catapult, 2017). Favaro et al. (2017) haben Unfälle mit automatisierten Fahrzeugen in Kalifornien zwischen 2014 und 2017 analysiert und zeigen, dass sich die meisten dieser Unfälle an Kreuzungen ereigneten, obwohl bei fast allen Unfällen das Manöver eines anderen Fahrzeugs zum Unfall beitrug. Dies geht auch aus Boggs et al. (2020b) hervor, die in ihrer Analyse ebenso Unfälle aus dem Jahr 2018 miteinbezogen haben. Darüber hinaus stellen Tunnel und Unterführungen eine Herausforderung dar und erhöhen die Komplexität für automatisierte Fahrsysteme, da GPS-Positionssignale bei der Einfahrt in oder Ausfahrt aus

dem Tunnel oder der Unterführung blockiert werden können oder die Beleuchtung sehr stark ist (vgl. Dempsey, 2019, Rosique et al., 2019). In Bezug auf die Fahrbahngeometrie erhöhen insbesondere geringe Fahrbahnbreiten oder Kurven die Komplexität für automatisierte Fahrsysteme, da das Sichtfeld für die Sensoren, die die Umgebung überwachen, kleiner ist (eingeschränkte Sichtweiten) und die Identifizierung von Objekten in der Umgebung tendenziell schlechter ist - obwohl aufgrund der geringeren Sichtweite möglicherweise weniger Objekte erkannt werden müssen (vgl. Campbell et al., 2010, Prakken, 2017).

Geschwindigkeitslimit

Unterschiedliche Geschwindigkeiten sind für den funktionierenden Einsatz von automatisierten Fahrzeugen von entscheidender Bedeutung. Höhere Fahrgeschwindigkeiten bedeuten weniger Reaktionszeit für das automatisierte Fahrsystem, d.h. die Zeit für (a) die Erfassung der Umgebung durch die Sensoren, (b) die Verarbeitung der Sensordaten durch die Software, (c) das Treffen einer Steuerungsentscheidung, (d) den Befehl an die Aktoren, (e) die Reaktion der Aktoren und (f) die Reaktion des Fahrzeugs selbst (vgl. Campbell et al., 2010). Höhere Geschwindigkeiten und damit geringere Reaktionszeiten erhöhen die Komplexität für automatisierte Fahrsysteme, da eine viel schnellere Rechenzeit des Systems und höhere Rechenressourcen benötigt werden (vgl. Pendleton et al., 2017, Czarnecki, 2018). Da die Sensoren von automatisierten Fahrsystemen in der Regel einen bestimmten Entfernungsbereich haben, sind diese Bereiche bei hohen Geschwindigkeiten im Vergleich zu niedrigeren Geschwindigkeiten zeitlich geringer (vgl. van Brummelen et al., 2018).

Stabilität der Operational Design Domain (ODD)

Die Stabilität der ODD beschreibt die Beständigkeit der jeweiligen Bedingungen der ODD¹. Dabei können wechselnde Verkehrsbedingungen und Ereignisse sowie Umweltbedingungen unterschieden werden. In Bezug auf die Verkehrsbedingungen stellen wechselnde Verkehrsbedingungen im Laufe des Tages (z.B. normaler Verkehr oder dichter Berufsverkehr), Bauarbeiten (mit Änderungen von Strassenmarkierungen und Schildern sowie neue Objekte wie Leitkegeln bzw. Pylone) sowie besondere Ereignisse (z.B. Unfälle, Einsatzfahrzeuge, Handzeichen der Polizei usw.) Herausforderungen für automatisierte Fahrsysteme dar: Das automatisierte Fahrsystem muss in der Lage sein, die verschiedenen visuellen und akustischen Hinweise zu erkennen und zu identifizieren, die mit bestehenden Verkehrszeichen und Strassenmarkierungen in Konflikt stehen könnten (vgl. Nowakowski et al., 2015, Thorn et al., 2018, Kopko, 2019). Zu den Umweltbedingungen gehören wetterbedingte Fahrbahnbedingungen wie Regen oder überflutete Fahrbahnen, Schnee, Schneeregen oder Glatteis, Feinstaub wie Nebel, Rauch oder Schlamm oder bestimmte Lichtverhältnisse/Beleuchtung (z.B. Nacht, Dämmerung, Sonnenblendung usw.), die die Komplexität für den Betrieb von automatisierten Fahrsystemen erhöhen, da sie die Erkennung und Identifizierung von Objekten erschweren (z.B. nicht erkennbare Fahrbahnmarkierungen aufgrund von Schnee) oder die Sichtbarkeit sowie die Funktionalität und Zuverlässigkeit der Kameras und Sensoren einschränken (z.B. Verringerung der maximalen Reichweite und Signalqualität) (vgl. Johnson, 2017, International Transport Forum, 2018, Thorn et al, 2018, Shoettle, 2017).

Abb. 20 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Komponenten des Frameworks abgeleitet von den Aufgaben eines automatisierten Fahrsystems.

¹ Eine Operational Design Domain (ODD) beschreibt unter welchen Bedingungen ein automatisiertes Fahrsystem betrieben werden kann. Unter anderem betrifft dies Komponenten wie Strassentypen (z.B. Design- und Layoutparameter), Geschwindigkeitsbereiche, Wetter, Tag/Nacht (vgl. AustriaTech 2019: 12)

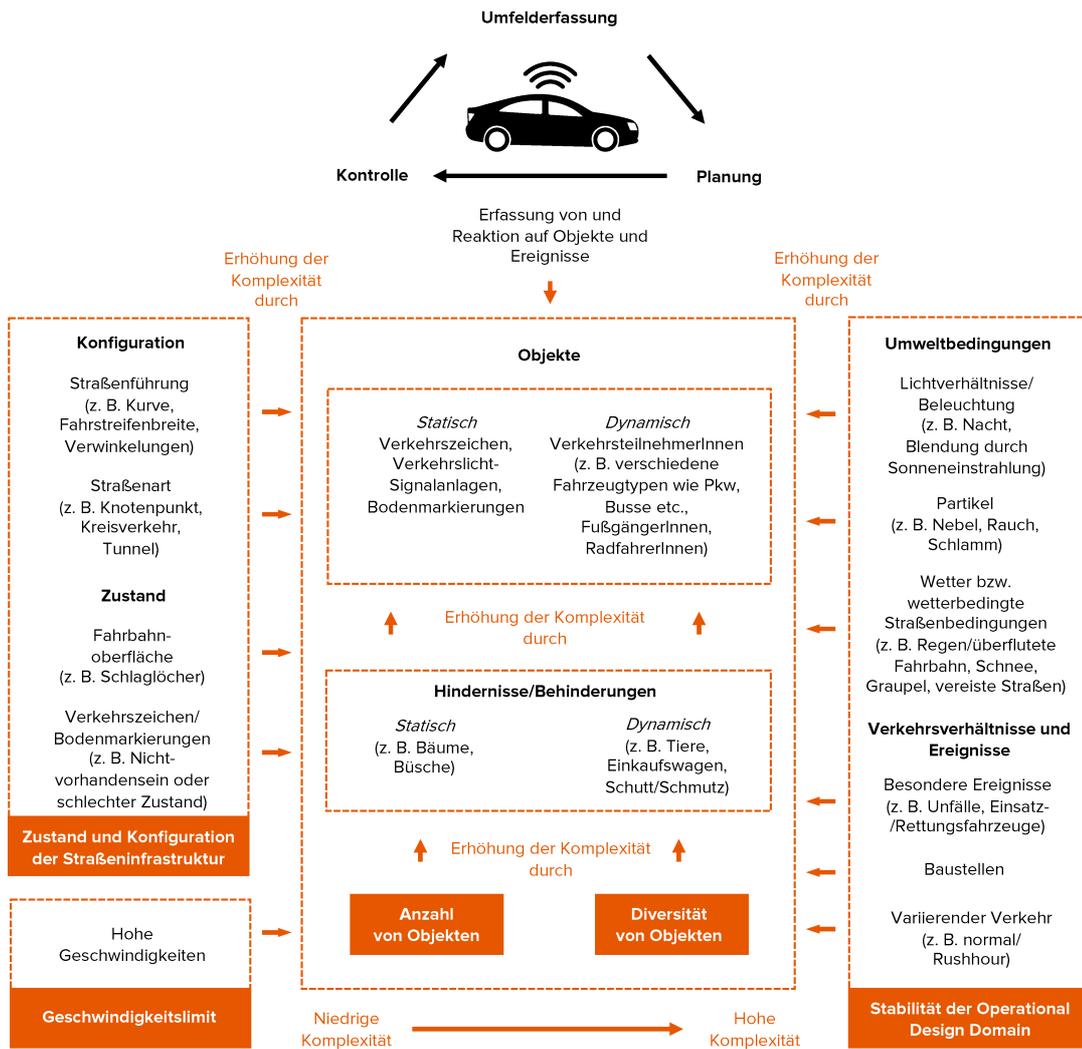


Abb. 20 Überblick über die Komponenten des Frameworks des Konzepts der Automated Drivability (vgl. Soteropoulos et al. 2020, Soteropoulos 2021).

3.2.2 Festlegung auf Strassennetz und Ableitung von Indikatoren für die Komponenten des Frameworks für die RZU-Region

Datensichtung und Abstimmungen zu vorhandenen Daten mit Behörden und Stakeholdern in der RZU-Region

Um den Ansatz des Frameworks entsprechend für das RZU-Gebiet anzuwenden und Indikatoren zur Abbildung der Komponenten im Strassennetz aufgrund der vorhandenen Daten durchzuführen, wurde eingangs eine Datensichtung durchgeführt sowie Termine zum Datenaustausch hinsichtlich vorhandener Daten abgehalten. Ziel der Datensichtung und der Termine zum Datenaustausch war es einen Überblick zu vorhandenen Daten zu in der gesamten RZU-Region verfügbaren Strassennetzen sowie zu den Indikatoren für die Abbildung der Komponenten des Frameworks zur Abbildung der Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge zu erhalten. Hierzu wurde zunächst eine erste Datensichtung z.B. hinsichtlich maps.zh.ch, des topografischen Landschaftsmodells (TLM) der Schweiz oder der Open Street Map durchgeführt. Im August 2021 und Oktober 2021 fanden zudem Abstimmungen mit Kontaktpersonen vom Tiefbauamt der Stadt Zürich sowie vom Tiefbauamt und vom Amt für Mobilität des Kantons Zürich statt. Anschliessend wurden die vorhandenen Daten analysiert und Festlegungen zum verwendeten Strassennetz getroffen, sowie Indikatoren für die Komponenten anhand der verfügbaren Daten abgeleitet.

Verwendetes Strassennetz

Auf Basis der Abstimmung wurde als Strassennetz für die Abbildung der Indikatoren das Strassennetz des topografischen Landschaftsmodells (TLM) gewählt. Dies bietet eine umfassende Abbildung des gesamten Strassen- und Wegenetzes der Schweiz und erfüllt damit die Anforderungen, einen konsistenten Basisdatensatz in der gesamten Bearbeitungsregion des RZU-Gebiets (Stadt Zürich und Kanton Zürich) bereitzustellen. Da das Strassennetz auch nicht befahrbare Strassen enthält, wurde zunächst anhand der Objektart der Strassenabschnitte versucht, das Strassennetz auf die lediglich für Pkw befahrbaren Kanten zu reduzieren. Zudem wurde der Datensatz zusätzlich mit dem später im Projekt vom Tiefbauamt des Kanton Zürich zur Verfügung gestellten Strassennetz von TomTom abgeglichen und nicht befahrbare Strassen extrahiert. Das Strassennetz wurde anschliessend in max. 100 Meter lange Abschnitte aufgeteilt, um eine möglichst genaue Abbildung der jeweiligen Indikatoren für die einzelnen Strassenabschnitte im Raum zu gewährleisten.

Ableitung Indikatoren je Komponente

In einem weiteren Schritt wurden für jede der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Komponenten des Frameworks der Automated Drivability unter Berücksichtigung der vorhandenen Daten in der RZU-Region (die durch die Datensichtungen und Abstimmungen identifiziert wurden) GIS-gestützt Indikatoren abgeleitet. Hierbei wurde unter Berücksichtigung der vorhandenen Datengrundlagen versucht, die Indikatoren für die Komponenten des Frameworks so abzuleiten, dass die Komponenten des Frameworks durch die abgeleiteten Indikatoren möglichst umfassend abgebildet werden können.

Für die Ableitung der Indikatoren wurde in ArcGIS Pro mit ModelBuilder ein Modell aufgebaut. Dieses ermöglichte während der Projektphase flexibel auf Änderungen und Anpassungen reagieren zu können. So wurden im Verlauf der Ausarbeitung z.B. nach Hinweisen durch die Begleitkommission zusätzliche Indikatoren (z.B. aufgrund verbesserter Datenlage, bswp. Datensatz zu Nutzerdaten zum Aufkommen von Velofahrern) hinzugefügt bzw. ausgetauscht.

Die Bestimmung der einzelnen Indikatoren folgte dabei jeweils der Logik, dass ein einzelner Strassenabschnitt bzw. dessen räumliches Umfeld in Bezug auf einen weiteren Datensatz untersucht wurde. Grundsätzlich wurden hier drei Analysearten unterschieden, die auch in Tabelle 1 dargestellt sind:

- **Binär:** Es wurde untersucht, ob auf dem betrachteten Strassenabschnitt ein Objekt bzw. Merkmal vorhanden ist oder nicht - z.B. "Gibt es auf dem Strassenabschnitt einen Velofahrstreifen? – ja/nein")
- **Numerisch:** Es wurde untersucht, wie viele Objekte bzw. Merkmale auf dem betrachteten Strassenabschnitt vorhanden sind,- z.B.: "Wie viele Verkehrslichtsignalanlagen befinden sich auf dem Strassenabschnitt?"
- **Kategorial:** Objekte bzw. Merkmale wurden vorab zu Kategorien zugeordnet, wobei diesen Kategorien wiederum ein Eignungswert für die Befahrbarkeit automatisierter Fahrzeuge zugeordnet und untersucht wurde, in welcher Kategorie des Objekts bzw. Merkmals sich der Strassenabschnitt befindet (z.B. Merkmal Baualter/Bauperiode und Kategorie 1961 bis 1970)

Im Folgenden werden die abgeleiteten Indikatoren je Komponente dargestellt und beispielhaft erläutert.

Anzahl der Objekte im Strassenraum

Zur Abbildung der Komponente Anzahl der Objekte im Strassenraum wurden insgesamt vier Indikatoren 1) Verkehrsbelastung (Durchschnittlicher Täglicher Verkehr - DTV), 2) Anzahl von Verkehrslichtsignalanlagen, 3) Anzahl von Stationen des öffentlichen Verkehrs und 4) Anzahl von behindernden Objekten im Strassenraum abgeleitet.



Indikator	Beschreibung
Verkehrsbelastung (DTV)	<ul style="list-style-type: none"> Direkte Abbildung der Anzahl der zu detektierenden (dynamischen) Fahrzeuge im Strassenraum Je höher die Anzahl, desto komplexer
Anzahl von Verkehrslichtsignalanlagen	<ul style="list-style-type: none"> direkte Abbildung der Anzahl von zu detektierenden (stationären) Verkehrslichtsignalanlagen Je höher die Anzahl, desto komplexer
Anzahl von Stationen des öffentlichen Verkehrs	<ul style="list-style-type: none"> indirekte Abbildung der Anzahl von zu detektierenden dynamischen Objekten wie Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs und Fussgängern höhere Anzahl von Stationen führt tendenziell zu einer erhöhten Präsenz von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs sowie Fussgängern und zu einer erhöhten Komplexität
Anzahl von behindernden Objekten im Strassenraum	<ul style="list-style-type: none"> direkte Abbildung der Anzahl von behindernden Objekten (z.B. Strassenmobiliar, Mülleimer, Bäume etc.) für Sensoren je höher die Anzahl desto komplexer

Verschiedenheit der Objekte im Strassenraum

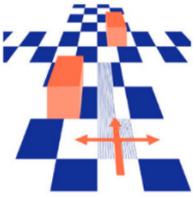
Zur Abbildung der Komponente "Verschiedenheit der Objekte im Strassenraum" wurden insgesamt sieben Indikatoren abgeleitet: 1) Vorhandensein von Verbot des Zugangs für Fussgänger und Velofahrer, 2) Vorhandensein von Velofahrtstreifen (Veloinfrastruktur auf der Fahrbahn), 3) Aufkommen von Velofahrern, 4) Anzahl von Zebrastreifen, 5) Vorhandensein von Fussgängerzone, 6) Vorhandensein von Begegnungszone und 7) Vorhandensein von Tram-Schienen auf Fahrbahn.



Indikator	Beschreibung
Vorhandensein von Verbot des Zugangs für Fussgänger und Velofahrer	<ul style="list-style-type: none"> Solche Verbote (z.B. Autobahnen/ Schnellstrassen/ Autostrassen) führen dazu, dass Verkehrsteilnehmer fernab von motorisierten Fahrzeugen dort meist nicht präsent sind. indirekte Abbildung geringere Komplexität (Detektion und Antizipieren von Fussgängern und Velofahrern dort meiste Zeit nicht nötig)
Vorhandensein von Velofahrtstreifen (Radinfrastruktur auf der Fahrbahn)	<ul style="list-style-type: none"> indirekte Abbildung des Vorhandenseins von Velofahrern auf der Fahrbahn, erhöhte Komplexität
Aufkommen von Velofahrern	<ul style="list-style-type: none"> direkte Abbildung des Vorhandenseins von Velofahrern auf der Fahrbahn, erhöhte Komplexität
Anzahl von Zebrastreifen	<ul style="list-style-type: none"> indirekte Abbildung des Vorhandenseins von Fussgängern, je höher die Anzahl, desto komplexer
Vorhandensein von Fussgängerzone	<ul style="list-style-type: none"> indirekte Abbildung des Vorhandenseins von Fussgängern, erhöhte Komplexität
Vorhandensein von Begegnungszone	<ul style="list-style-type: none"> indirekte Abbildung des Vorhandenseins von Fussgängern und Velofahrern, erhöhte Komplexität
Vorhandensein von Tram-Schienen auf Fahrbahn	<ul style="list-style-type: none"> indirekte Abbildung des Vorhandenseins von Trams auf der Fahrbahn, erhöhte Komplexität (Detektion und Antizipieren)

Zustand und Konfiguration der Strasseninfrastruktur

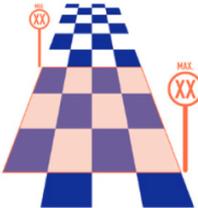
Für die Abbildung der Komponente Zustand und Konfiguration der Strasseninfrastruktur wurden insgesamt 8 Indikatoren abgeleitet: 1) Kreuzungstyp, 2) Vorhandensein von Bahnübergang (SBB), 3) Strassenbreite, 4) Vorhandensein von Tunnel, 5) Gebietstyp: Landnutzung und -dichte, 6) Baualter/-periode, 7) Vorhandensein von richtungsgetrenntem Verkehr und 8) Steigung von Strassenabschnitt.



Indikator	Beschreibung
Kreuzungstyp	<ul style="list-style-type: none"> • direkte Abbildung, höhere Komplexität bei komplexen Kreuzungsformen durch Erhöhung von Verkehrsrelationen, insbesondere an unsignalisierten Kreuzungen • geringe Komplexität im Fall von keiner Kreuzung oder drei-strahliger Kreuzung mit Verkehrslichtsignalanlage, höhere Komplexität bei fünf oder mehrstrahligen Kreuzungen ohne Verkehrslichtsignalanlage
Vorhandensein von Bahnübergang SBB	<ul style="list-style-type: none"> • direkte Abbildung, höhere Komplexität durch Schrankenanlagen
Strassenbreite	<ul style="list-style-type: none"> • direkte Abbildung, breitere Strassen weniger komplex, da grösseres Sichtfeld der Sensoren zur Überwachung der Umgebung und bessere Vorhersage von erkannten Objekten
Vorhandensein von Tunnel	<ul style="list-style-type: none"> • direkte Abbildung, höhere Komplexität, da GPS-Signale blockiert werden können
Gebietstyp: Landnutzung und -dichte	<ul style="list-style-type: none"> • indirekte Abbildung: Industriezonen weniger komplex (übersichtliche Strassenräume ermöglichen einfachere Bedingungen für die Perception) als Misch- bzw. Geschäftszonen
Baualter /-periode	<ul style="list-style-type: none"> • indirekte Abbildung: Bereiche aus den 1960er/70er Jahren (autofreundliche Gestaltung, einfachere Bedingungen für die Perception als Gründerzeitbereiche)
Vorhandensein von richtungstrenntem Verkehr	<ul style="list-style-type: none"> • direkte Abbildung, geringere Komplexität, da keine entgegenkommenden Fahrzeuge, die detektiert werden müssen
Steigung von Strassenabschnitt	<ul style="list-style-type: none"> • direkte Abbildung, bei höherer Steigung komplexere Bedingungen für Perception

Geschwindigkeitslimit

Für die Komponente Geschwindigkeitslimit wurde ein Indikator 1) (Maximales) Geschwindigkeitslimit abgeleitet.



Indikator	Beschreibung
(Maximales) Geschwindigkeitslimit	<ul style="list-style-type: none"> • direkte Abbildung, höhere Komplexität mit höherer Geschwindigkeit, da geringere Reaktionszeit des automatisierten Fahrsystems zur Ausführung von Detektion, Planung, Treffen und Ausführung einer entsprechenden Fahrentscheidung (schnelle Rechenzeit z.B. zur Umfelderkennung nötig)

Stabilität der Operational Design Domain

Für die Komponente Stabilität der Operational Design Domain wurden insgesamt zwei Indikatoren 1) Niederschlagsmengen und 2) Höhenmodell abgeleitet.



Indikator	Beschreibung
Niederschlagsmengen	<ul style="list-style-type: none"> • indirekte Abbildung, Strassen mit geringen Niederschlagsmengen implizieren stabilere und bessere Wetterbedingungen und damit geringere Komplexität
Höhenmodell	<ul style="list-style-type: none"> • indirekte Abbildung, zusätzlich Berücksichtigung von Höhenlage in Anbetracht von Schnee

Tab. 3 gibt eine Übersicht über die Indikatoren und die verwendeten Datenquellen sowie darüber, welche Komponente des Frameworks sie jeweils abbilden. Letztlich wird durch die Ableitung der Indikatoren dabei die Befahrbarkeit des aktuellen Strassennetzes im RZU-Gebiet für automatisierte Fahrzeuge bewertet.

Formel 1: Verknüpfung der Indikatoren

Zur Verknüpfung der Indikatoren wurden die Werte für jeden Indikator zunächst mit Hilfe folgender Formel normiert und standardisiert:

$$X'_{ij} \begin{cases} \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}}, & \text{positiv} \\ \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}}, & \text{negativ} \end{cases}$$

Dabei sind:

- X_{ij} der Wert des Indikators i für den Strassenabschnitt j und
- $\max X_{ij}$ und $\min X_{ij}$ die maximalen bzw. minimalen Werte des Indikators i für alle Strassenabschnitte im Untersuchungsgebiet (RZU-Gebiet)

Bei positiven Indikatoren handelt es sich um jene Indikatoren, bei denen ein höherer Wert des Indikators eine höhere aF-Befahrbarkeit darstellt (z.B. Strassenbreite), während es sich bei negativen Indikatoren um jene handelt, bei denen ein geringerer Wert des Indikators eine höhere aF-Befahrbarkeit bedeutet (z.B. Anzahl von Ampeln) – siehe hierzu auch Tabelle 1.

Formel 2: Verknüpfung der Indikatorwerte

Anschliessend wurden die Indikatorwerte für jede Komponente des Frameworks anhand folgender Formel verknüpft:

$$X_{c1j} = (Xc1_{i1j} + Xc1_{i2j} \dots) / Ic1_n$$

Dabei sind:

X_{c1j} der Wert des Komponente 1 für den Strassenabschnitt j

$Xc1_{i1j}$ der Wert des Indikators $i1$ der Komponente 1

$Ic1_n$ die Gesamtzahl der Indikatoren für die Komponente 1

Abb. 21 gibt einen Überblick über die berechneten Werte für die fünf Komponenten des Frameworks: 1) Anzahl der Objekte im Strassenraum, 2) Verschiedenheit der Objekte im Strassenraum, 3) Zustand und Konfiguration der Strasseninfrastruktur, 4) Geschwindigkeitslimit und 5) Stabilität der Operational Design Domain anhand der abgeleiteten Indikatoren.

Tab. 3 Überblick über abgeleitete Indikatoren für die Komponenten des Frameworks für die RZU-Region

Indikator	Quelle, Jahr	Einfluss	Typ	Anzahl der Objekte im Strassenraum	Verschiedenheit der Objekte im Strassenraum	Komponente		
						Zustand und Konfiguration der Strasseninfrastruktur	Geschwindigkeitslimit	Stabilität der Operational Design Domain
Anzahl von Verkehrslichtsignalanlagen	Stadt/Kanton ZH, opendata.swiss, 2021	negativ	numerisch	✓		(✓)		
Anzahl von behindernden Objekten im Strassenraum	Open Street Map, 2022	negativ	numerisch	✓				
Anzahl von Stationen des öfftl. Verkehrs	Stadt/Kanton ZH, opendata.swiss, 2021	negativ	numerisch	✓		(✓)		
Verkehrsbelastung (DTV)	Verkehrsmodell Kanton ZH, 2019	negativ	numerisch	✓				
Vorhandensein von Verbot des Zugangs für Fussgänger und Velofahrer	TLM Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2022	negativ	binär (ja)		✓			
Vorhandensein von Velostreifen (auf Fahrbahn)	Stadt/Kanton ZH, opendata.swiss, 2021	negativ	binär (ja)	(✓)	✓			
Aufkommen von Velofahrern	Strava Metro, 2022	Negativ	Numerisch	(✓)	✓			
Vorhandensein von Begegnungszone	Stadt/Kanton ZH, opendata.swiss, 2021 + Open Street Map, 2022	negativ	binär (ja)	(✓)	✓			
Anzahl von Zebrastreifen	Stadt/Kanton ZH, opendata.swiss, 2021	negativ	numerisch	(✓)	✓			
Vorhandensein von Fussgängerzone	Stadt/Kanton ZH, opendata.swiss, 2021 + Open Street Map, 2022	negativ	binär (ja)	(✓)	✓			
Vorhandensein von Tram-Schienen auf Fahrbahn	Stadt/Kanton ZH, opendata.swiss, 2021	negativ	binär (ja)	(✓)	✓	(✓)		
Kreuzungstyp	TLM Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2022	negativ	kategorisch			✓		
Strassenbreite	TLM Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2022	positiv	kategorisch	(✓)		✓		
Vorhandensein von Tunnel	TLM Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2022	negativ	binär (ja)			✓		
Vorhandensein von Bahnübergang SBB	SBB, 2022	negativ	binär (ja)			✓		
Baualter/-periode	Stadt/Kanton ZH, opendata.swiss, 2021	positiv	kategorisch		(✓)	✓		
Gebietstyp: Landnutzung und Dichte	Stadt/Kanton ZH, opendata.swiss, 2021	negativ	kategorisch			✓		
Vorhandensein von richtungsgetretem Verkehr	TLM Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2022	positiv	binär (ja)			✓		
Steigung von Strassenabschnitt	DHM25 Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2022	negativ	Numerisch			✓		
(Maximales) Geschwindigkeitslimit	Verkehrsmodell Kanton ZH, 2019	negativ	numerisch				✓	
Niederschlagsmengen	Meteoschweiz, 2022	negativ	numerisch					✓
Höhenmodell	DHM25 Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2022	negativ	numerisch					✓

✓ = vollständige Abbildung der Komponente durch Indikator; (✓) = teilweise Abbildung der Komponente durch Indikator

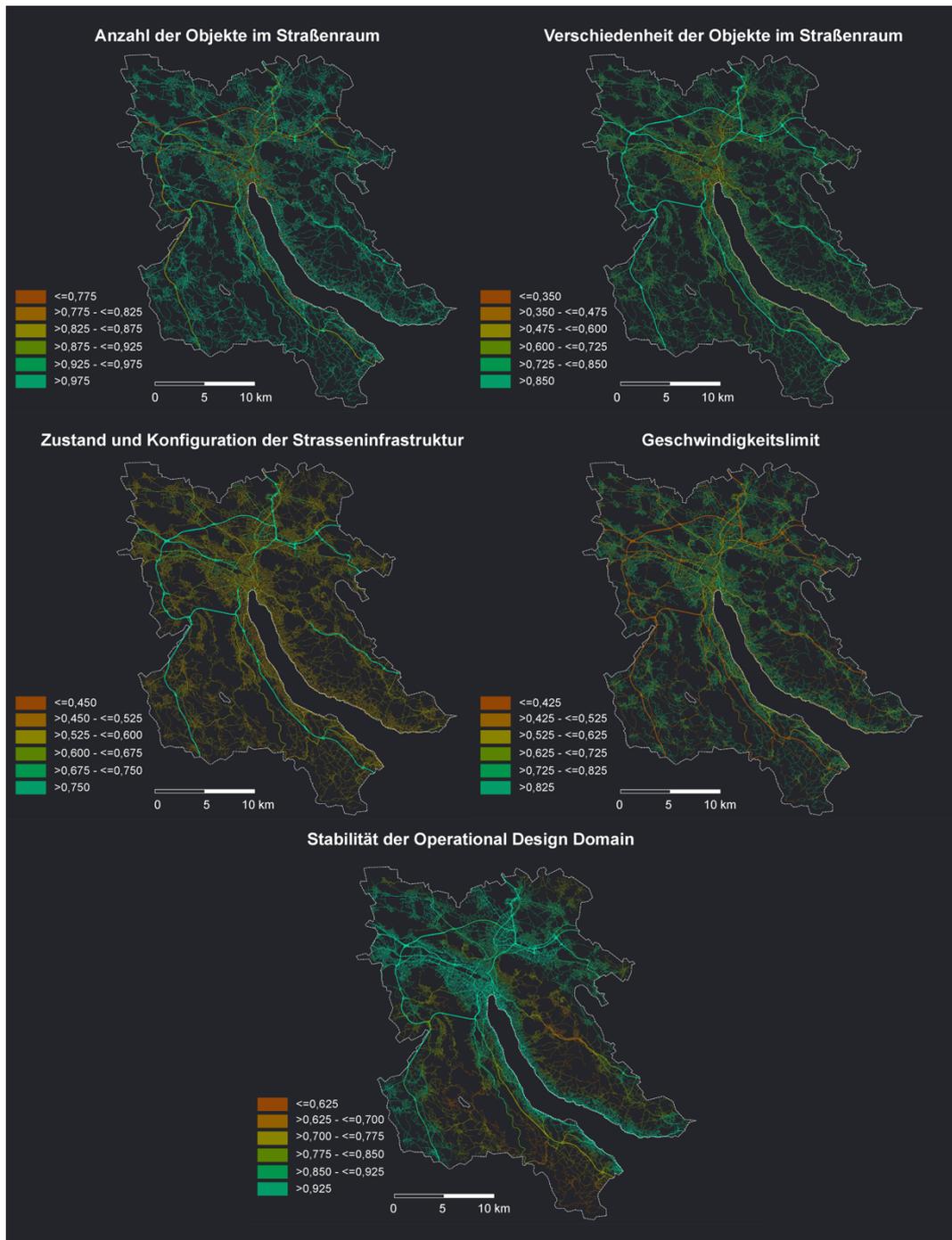


Abb. 21 Überblick über die berechneten aF-Befahrbarkeitswerte für die fünf Komponenten des Frameworks anhand der abgeleiteten Indikatoren

3.2.3 Gewichtung der Komponenten, Kalibrierung und Gesamtindex aF-Befahrbarkeit

Gewichtung der Komponenten und Kalibrierung

Anschliessend wurde eine Verknüpfung der Komponenten mittels Gewichtung einzelner Komponenten zur Bildung des Befahrbarkeitsindex vorgenommen. Dabei wurde bei der Gewichtung berücksichtigt, dass Studien in der Literatur zu relevanten Faktoren hinsichtlich der Komplexität für automatisierte Fahrsysteme vor allem die drei folgenden Komponenten betonen:

- Zustand und Konfiguration der Strasseninfrastruktur (Favarò et al., 2018, Van Brummelen et al. 2018)
- Vorhandensein von anderen Verkehrsteilnehmern fernab von motorisierten Fahrzeugen (vgl. Van Brummelen et al. 2018, Shladover 2018, Braun et al. 2018)
- Geschwindigkeit (vgl. Pendleton et al. 2017, Shladover 2018)

Aufgrund der Betonung dieser drei Komponenten in der Literatur wurden in einem ersten Schritt drei unterschiedliche Gewichtungen der Komponenten vorgenommen, wobei vor allem die Komponenten Zustand und Konfiguration der Strasseninfrastruktur, Verschiedenheit der Objekte im Strassenraum und Geschwindigkeitslimit höher gewichtet wurden. Tab. 4 gibt einen Überblick über die drei Gewichtungen im Vergleich zur Gewichtung der Komponenten mit gleichen Gewichten.

Tab. 4 Überblick über die Gewichtungen für die Komponenten

Komponenten	Gewichtung 1 (Gleiche Gewichte)	Gewichtung 2 (Abnehmende Gewichte von 5 nach 1)	Gewichtung 3 (Abnehmende Gewichtung mit höherem Gewicht für Komponente 2)	Gewichtung 4 (Abnehmende Gewichtung mit höherem Gewicht für Komponenten 2 und 3)
1: Anzahl der Objekte im Strassenraum	3 (0,200)	2 (0,133)	2 (0,133)	2 (0,133)
2. Verschiedenheit der Objekte im Strassenraum	3 (0,200)	5 (0,333)	6 (0,400)	6 (0,400)
3. Zustand und Konfiguration der Strasseninfrastruktur	3 (0,200)	3 (0,200)	3 (0,200)	4 (0,266)
4. Geschwindigkeitslimit	3 (0,200)	4 (0,266)	3 (0,200)	2 (0,133)
5. Stabilität der Operational Design Domain	3 (0,200)	1 (0,066)	1 (0,066)	1 (0,066)

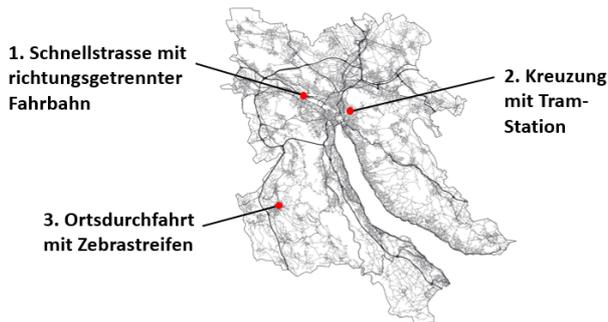
Um die Ergebnisse des Befahrbarkeitsindex hinsichtlich der einzelnen Gewichtungen der Komponenten zu untersuchen und jene Gewichtungsvariante mit den plausibelsten Werten abzuleiten, wurden die Ergebnisse für die Berechnung des Befahrbarkeitsindex mit den unterschiedlichen Gewichtungen anhand zahlreicher Bilder von verschiedenen Strassenräumen in der RZU-Region verglichen und die unterschiedlichen Werte im Projektteam diskutiert.

In Tab 5 werden exemplarisch drei verschiedene Strassenabschnitte in der RZU-Region inklusive der Werte des berechneten Befahrbarkeitsindex jeweils für die vier Gewichtungen dargestellt. Hierbei werden für 1) eine Schnellstrasse mit richtungsgetrennter Fahrbahn, 2) eine Kreuzung mit Tram-Station und 3) eine Ortsdurchfahrt mit Zebrastreifen die

unterschiedlichen aF-Befahrbarkeitswerte für die jeweiligen Gewichtungen aufgezeigt. Die exemplarischen Strassenräume befinden sich dabei über das RZU-Gebiet verteilt.

Tab. 5 Überblick über Werte des Befahrbarkeitsindex in verschiedenen exemplarischen Strassenräumen nach unterschiedlichen Gewichtungen

Strassenräume		Gewichtung 1	Gewichtung 2	Gewichtung 3	Gewichtung 4
1. Schnellstrasse mit richtungsgetrennter Fahrbahn		0,786	0,744	0,773	0,794
2. Kreuzung mit Tram-Station		0,639	0,592	0,583	0,559
3. Ortsdurchfahrt mit Zebrastrreifen		0,722	0,668	0,669	0,655



Der Vergleich der Werte des Befahrbarkeitsindex anhand der verschiedenen Strassenräume zeigt für die verschiedenen Gewichtungen sehr unterschiedliche Werte. Für die Schnellstrasse mit richtungsgetrennter Fahrbahn, bei der man auch anhand des Bilds des Strassenraums von einer hohen aF-Befahrbarkeit ausgehen würde, zeigt die Gewichtung 4 den höchsten und damit plausibelsten Wert aller Gewichtungen. Gleichfalls zeigt sich auch bei der Kreuzung mit Tram-Station, bei der man anhand des Bilds des Strassenraums von einer sehr geringen aF-Befahrbarkeit ausgehen würde, der niedrigste und damit plausibelste Wert bei der Gewichtungsvariante 4. Für die Ortsdurchfahrt am Zebrastrreifen zeigen sich für alle vier Gewichtungen Werte, die im Wertebereich zwischen jenen Werten der ersten beiden Strassenräume liegen. Tendenziell ist jedoch auch dieser Strassenraum aufgrund der Betrachtung als eher gering befahrbar einzustufen, wenngleich nicht so gering befahrbar wie die Kreuzung mit Tram-Station. Daher erscheint auch hier der Wert des Befahrbarkeitsindex anhand der Gewichtungsvariante 4 am plausibelsten.

Im Rahmen eines Kalibrierungsworkshops mit verschiedenen Experten und Stakeholdern wurden die oben beschriebenen Gewichtungen samt der exemplarischen Analyse für die unterschiedlichen Strassenräume präsentiert und diskutiert. Auch aus Sicht der Experten erschien die Wahl für die Gewichtungsvariante 4 für die Ermittlung des Befahrbarkeitsindex am schlüssigsten. Zudem wurde die Gewichtung auch im Rahmen des ersten Treffens der Begleitkommission diskutiert und auch hier fand der Ansatz zur Ermittlung des Gesamtindex für die aF-Befahrbarkeit über die Gewichtungsvariante 4 Zustimmung. Folglich wurde für die Herausbildung des Befahrbarkeitsindex die Gewichtungsvariante 4 (in Tab. 5 fett dargestellt) verwendet.

Formel 3: Bildung des Gesamtindex

Anhand der durch die Kalibrierung abgeleiteten Gewichtungsvariante 4 wurde anschliessend der Gesamtindex für die aF-Befahrbarkeit herausgebildet. Zur Verknüpfung der Komponenten und Indikatorwerte wurde diese für jeden Strassenabschnitt unter Verwendung folgender Formel durch eine Addition der Werte des Indikators für jede Komponente des Frameworks summiert und durch die Anzahl der Indikatoren pro Komponente geteilt sowie mit dem jeweiligen Gewicht multipliziert, um den aggregierten Wert des Befahrbarkeitsindex für jeden Strassenabschnitt zu erhalten:

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

Wobei

- X_{ADXj} der Wert der aF-Befahrbarkeit für den Strassenabschnitt j
- $Xc1_{i1j}$ der Wert des Indikators $i1$ der Komponente 1,
- $Xc2_{i1j}$ der Wert des Indikators $i1$ der Komponente 2 ist ...; und
- $Ic1_n$ die Gesamtzahl der Indikatoren für die Komponente 1 und
- $Ic2_n$ die Gesamtzahl der Indikatoren für die Komponente 2 ... darstellt.

3.3 Ergebnisse: Fallbeispiel aF-Befahrbarkeit RZU-Gebiet

3.3.1 Makro-Ebene: aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes im gesamten RZU-Gebiet

Abb. 22 (auf der folgenden Seite) zeigt die Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge im Strassennetz des RZU-Gebietes. Strassenabschnitte in grün zeigen dabei aus technischen-infrastruktureller Sicht gut befahrbare Abschnitte für automatisierte Fahrzeuge. Strassenabschnitte in braun stellen hingegen aus technisch-infrastruktureller Sicht schlecht befahrbare Abschnitte für automatisierte Fahrzeuge dar. Während es sich bei den Strassenabschnitten in Grün um ein eher kontrolliertes Umfeld für die Umfelderkennung, die Planung und Kontrolle der Fahraufgabe handelt und die Fahraufgabe in diesem Umfeld besser planbar ist, handelt es sich bei den in braun dargestellten Strassenabschnitten um ein eher instabiles Umfeld, in welchem auch die Fahraufgabe schwieriger planbar ist. Mit anderen Worten findet man in braunen Strassenabschnitten komplexere Szenarien vor, die dazu führen, dass die Fehlerquote von automatisierten Fahrzeugen in diesen Abschnitten prinzipiell höher ist, als in grünen Strassenabschnitten, wo weniger komplexe Szenarien vorherrschen bzw. durch das automatisierte Fahrsystem zu bewältigen sind (vgl. Vogt 2017).

Die Abbildung zeigt, dass vor allem Autobahnen, auf denen keine Fussgänger und Velofahrer unterwegs sind, jedoch auch einzelne Bereiche im Stadtumland von Zürich, die durch geringe Geschwindigkeiten, wenig Verkehr und insbesondere wenig Fussgänger und Velofahrer gekennzeichnet sind, aus technisch-infrastruktureller Sicht eine höhere Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge aufweisen. Hierzu gehören insbesondere Gebiete in den Gemeinden Dietikon und Regensdorf im (Nord-)Westen von Zürich, aber auch Gebiete in der Gemeinde Affoltern am Albis.

Zürich und dabei insbesondere sein Zentrum sowie Teile bestimmter Quartiere wie Oerlikon mit ihren verwinkelten Strassen, häufig komplexen Kreuzungen und vorhandenem öffentlichen Verkehr zeigen eine schlechte aF-Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge. Dies gilt auch für Hauptverkehrsstrassen sowohl in Zürich aber auch ausserhalb von Ortschaften, die durch eine höhere Fahrgeschwindigkeit und beispielsweise – am Westufer des Zürichsees – auch durch eine Vielzahl an Velofahrern gekennzeichnet sind. Darüber hinaus zeigt sich eine schlechte aF-Befahrbarkeit auch in den Ortskernen von verschiedenen Städten in der Region wie z.B. Adliswil im Süden von Zürich.

Insgesamt stellt das RZU-Gebiet also keinen homogenen Raum für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge dar. Dies wird auch nochmals deutlich, wenn man auf den Anteil des Strassennetzes im gesamten RZU-Gebiet nach unterschiedlicher Befahrbarkeit (vgl. Abb. 23) blickt. Tab. 6 zeigt ausgehend von der Bewertung der aF-Befahrbarkeit in Abb. 22 die Beschreibung der Wertebereiche für die Kategorisierung in eine gute, gute bis mittlere, mittlere bis schlechte und schlechte Befahrbarkeit.

Tab. 6 Überblick über Wertebereiche für gute, mittlere und schlechte aF-Befahrbarkeit

Kategorie aF-Befahrbarkeit	Wertebereich	Beschreibung
gut	$\leq 0,675$	kontrolliertes Umfeld, Fahraufgabe gut planbar, niedrige Fehlerquote des automatisierten Fahrsystems
gut – mittel	$<0,675$ bis $\leq 0,725$	eher kontrolliertes Umfeld, Fahraufgabe gut bis mittel planbar, niedrige bis mittlere Fehlerquote des automatisierten Fahrsystems
mittel – schlecht	$>0,725$ bis $\leq 0,775$	eher instabiles Umfeld, Fahraufgabe mittel bis schwierig planbar, mittlere bis hohe Fehlerquote des automatisierten Fahrsystems
schlecht	$> 0,775$	instabiles Umfeld, Fahraufgabe schwierig planbar, hohe Fehlerquote des automatisierten Fahrsystems

Strassenräume, die eine eher schlechte Befahrbarkeit (Befahrbarkeit $\leq 0,675$) für automatisierte Fahrzeuge aufweisen, machen etwa 12% des gesamten Strassennetzes des RZU-Gebiets aus und befinden sich vor allem im Zentrum von Zürich. Es handelt sich dabei jedoch auch um Hauptverkehrsstrassen und Kantonsstrassen mit einem hohen Geschwindigkeitslimit und dem Vorhandensein von Fussgängern und Velofahrern, die aus technisch-infrastruktureller Sicht tendenziell schlechter für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge geeignet sind.

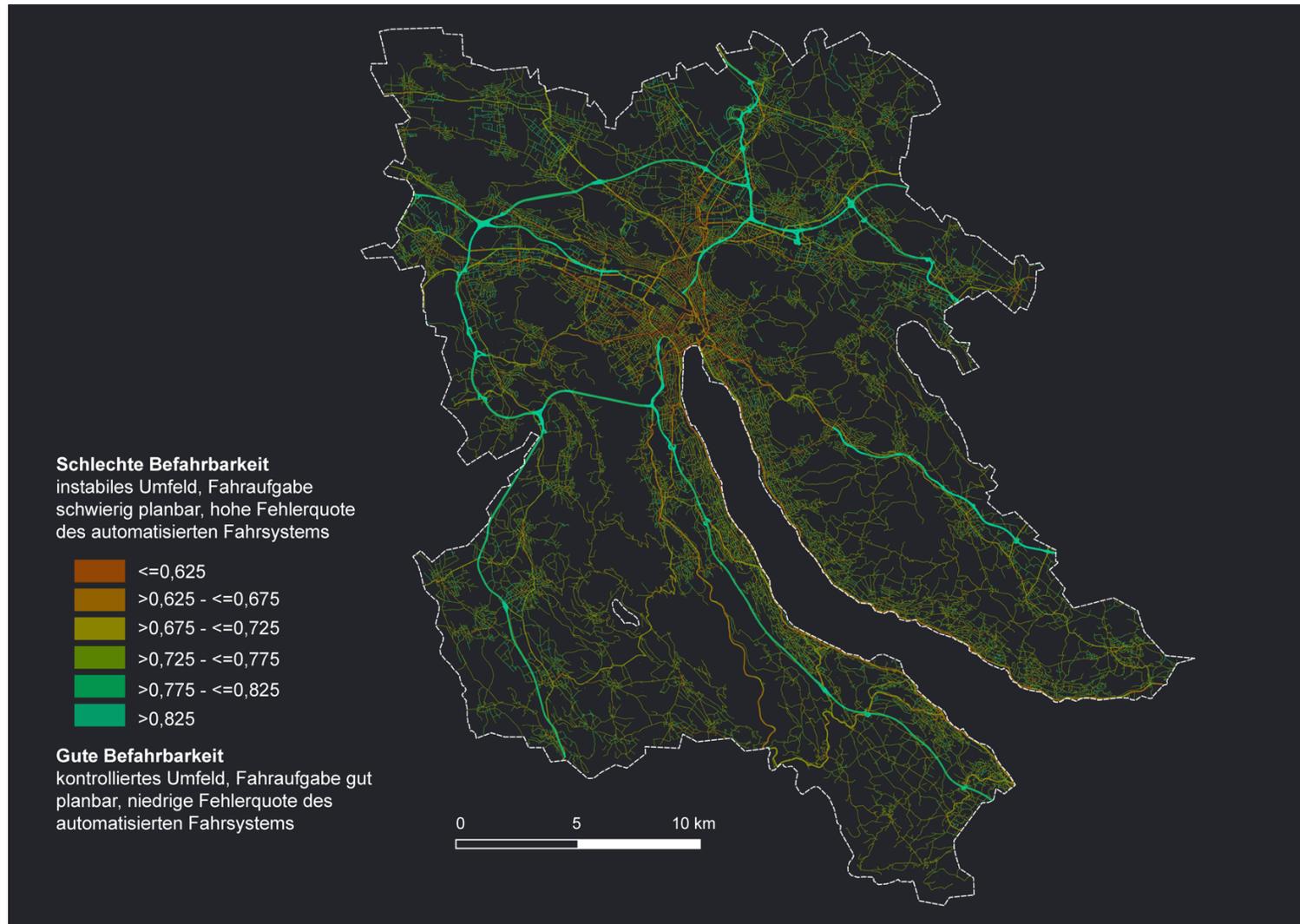


Abb. 22 Bewertung der aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes im RZU-Gebiet

Strassenräume, die eine eher gute Befahrbarkeit (Befahrbarkeit $>0,775$) für automatisierte Fahrzeuge aufweisen, machen 14% des gesamten Strassennetzes der RZU-Region aus und befinden sich im Norden bzw. Nordosten und -westen von Zürich, jedoch auch im Südwesten der RZU-Region, die durch eine geringe Geschwindigkeit, wenig Verkehr und wenig Fussgänger und Velofahrer im Strassenraum gekennzeichnet sind. Zudem gehören auch vor allem Autobahnen zu jenen Strassenräumen, die aus technisch-infrastruktureller Sicht tendenziell besser für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge geeignet sind, da sie trotz des hohen Geschwindigkeitslimits weniger komplexe Fahrumgebungen (richtungstrennte Fahrbahnen, in der Regel keine Fussgänger und Velofahrer) für automatisierte Fahrzeuge aufweisen.

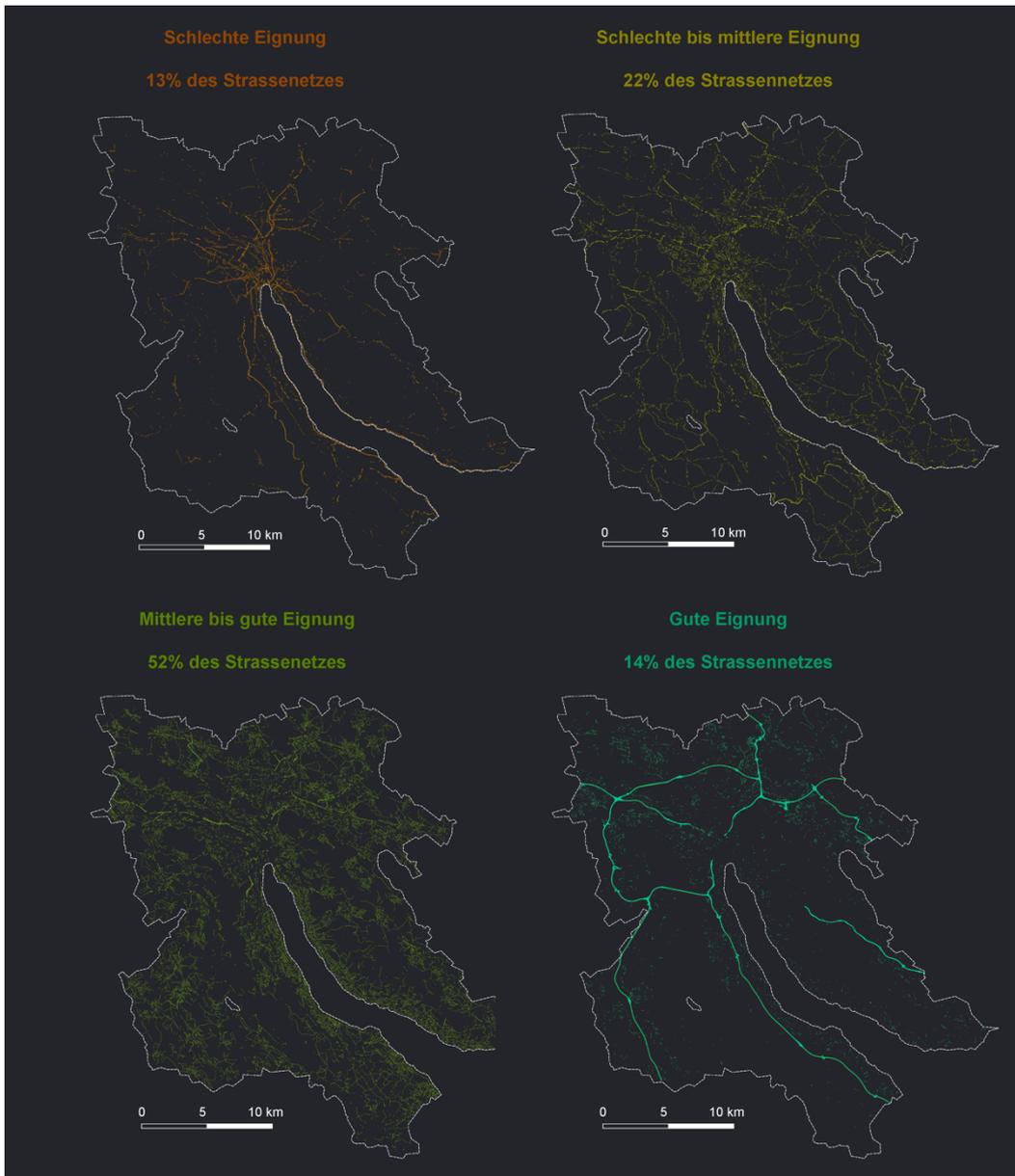


Abb. 23 Bewertung der aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes im RZU-Gebiet und Anteil an Gesamtlänge des Strassennetzes des RZU-Gebiets

3.3.2 Meso-Ebene: aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes in den Gebietstypen

In einem weiteren Schritt wurde zudem die Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge speziell in den in Kapitel 2.2 abgeleiteten Gebietstypen untersucht. Abb. 24 gibt einen Überblick über die Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge sowie die Lage der abgeleiteten Gebietstypen 1) Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss, 2) Peripheres Siedlungsgebiet, 3) Dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss, 4) Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss, 5) Dörfliches Gebiet mit Bahnanschluss, 6) Dörfliches Gebiet mit MIV-Orientierung, 7) Innenstadt Zürich.

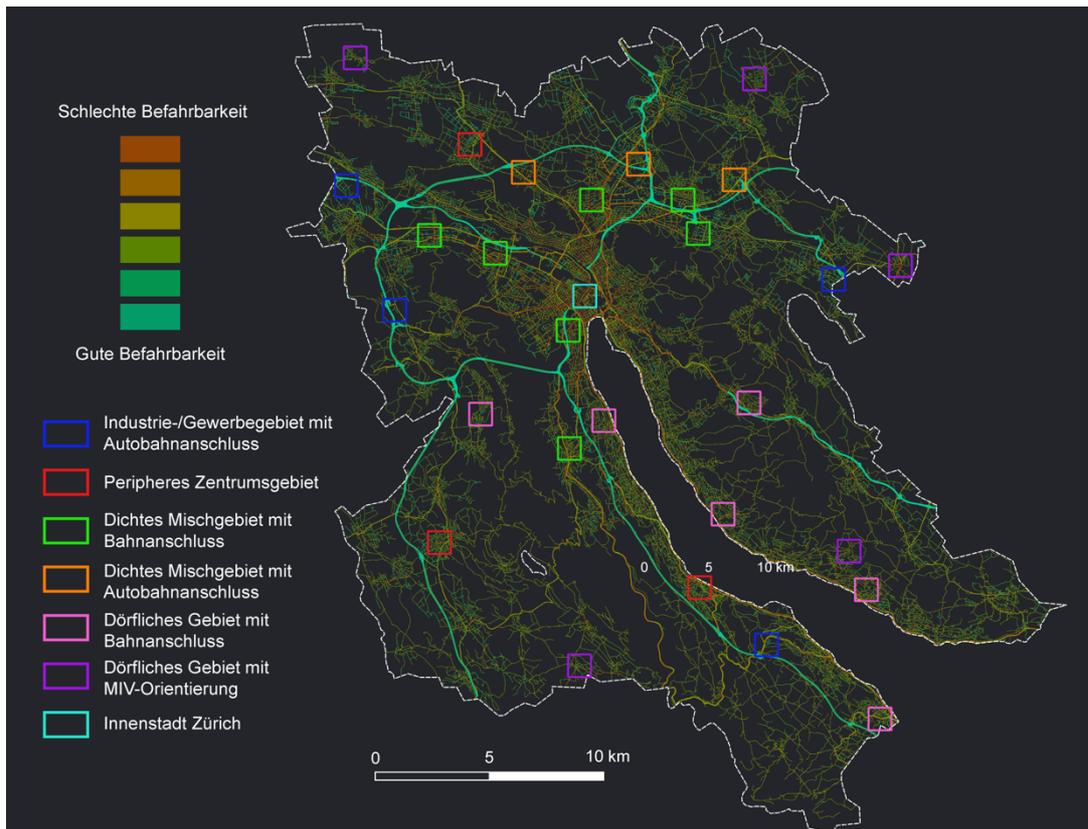


Abb. 24 Bewertung der aF-Befahrbarkeit im RZU-Gebiet und Gebietstypen

Tab. 7 und Abb. 25 geben einen Überblick hinsichtlich der aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes in den einzelnen Gebietstypen. Es wird deutlich, dass die Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge in den Gebietstypen Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss und dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss am besten ist: Im Gebietstyp Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss beträgt der Anteil der gut geeigneten Strassenabschnitte an der Gesamtlänge des Strassennetzes in den Gebieten 45% und der Anteil der schlecht bewerteten Strassenabschnitte an der Gesamtlänge des Strassennetzes in den Gebieten nur 4%. Auch das dichte Mischgebiet mit Autobahnanschluss weist im Vergleich mit den anderen Gebietstypen mit 26% einen hohen Anteil von gut befahrbaren Strassenabschnitten an der Gesamtlänge des Strassennetzes auf.

Hingegen weist allen voran der Gebietstyp Innenstadt Zürich mit 52% einen im Vergleich sehr hohen Anteil schlecht befahrbarer Strassenabschnitte an der Gesamtlänge des Strassennetzes im Gebietstyp auf. Ein ebenfalls hoher Anteil schlecht befahrbarer Strassenabschnitte für automatisierte Fahrzeuge zeigt sich auch im Gebietstyp dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss, wobei dieser Gebietstyp mit einem Anteil von 18% auch einen vergleichsweise hohen Anteil eher gut befahrbarer Strassenabschnitte an der Gesamtlänge des Strassennetzes im Gebietstyp aufweist.

Die Gebietstypen peripheres Zentrumsgebiet, dörfliches Gebiet mit MIV-Orientierung und dörfliches Gebiet mit Bahnanschluss weisen im Vergleich dazu einen sehr hohen Anteil (jeweils 60% oder mehr) von Strassenabschnitten auf, die durch eine gute bis mittlere aF-Befahrbarkeit gekennzeichnet sind – nur ein geringer Anteil von Strassenabschnitten weist somit in diesen Gebietstypen eine gute oder schlechte aF-Befahrbarkeit auf.

Tab. 7 aF-Befahrbarkeit nach Gebietstypen

Gebietstyp	Anzahl Gebiete	Bewertung aF-Befahrbarkeit: Anteil an Gesamtlänge des Strassennetzes in den Gebieten				Gesamtlänge des Strassennetzes in den Gebieten
		gut	gut - mittel	mittel - schlecht	schlecht	
Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss	4	45%	37%	14%	4%	39,9 km
Peripheres Zentrumsgebiet	3	11%	62%	18%	9%	55,2 km
Dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss	7	18%	31%	26%	25%	148,6 km
Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss	3	26%	41%	20%	13%	62,9 km
Dörfliches Gebiet mit Bahnanschluss	6	7%	60%	22%	12%	97,2 km
Dörfliches Gebiet mit MIV-Orientierung	5	7%	66%	17%	11%	51,0 km
Innenstadt Zürich	1	1%	18%	29%	52%	27,8 km

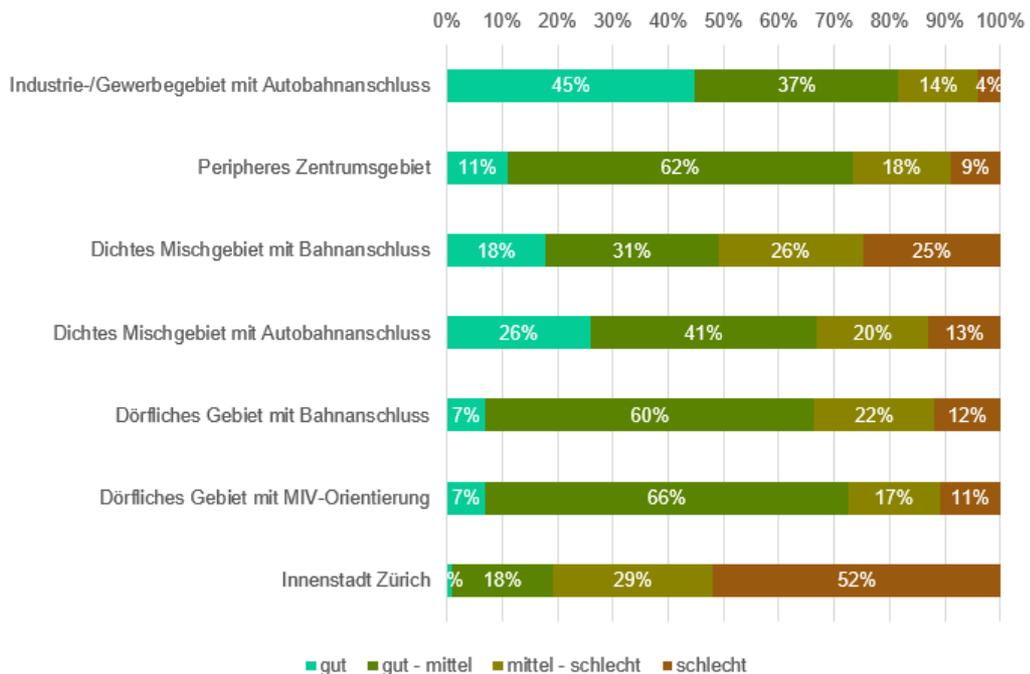


Abb. 25 aF-Befahrbarkeit nach Gebietstypen (Anteil an Gesamtlänge des Strassennetzes in den Gebieten)

3.3.3 Mikro-Ebene: aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes nach Strassentypen

Zusätzlich wurde auch die Befahrbarkeit für automatisierte Fahrsysteme nach unterschiedlichen Strassentypen untersucht. Tab. 8 und Abb. 26 geben einen Überblick

hinsichtlich der aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes für verschiedene Strassentypen. Hierbei zeigen sich folgende Ergebnisse:

- Vor allem Autobahnen und Autostrassen weisen (insbesondere aufgrund des Nicht-Vorhandenseins von Velofahrern und Fussgängern sowie richtungsgetreuten Fahrbahnen) einen hohen Anteil (nahezu 100%) von gut befahrbaren Strassenabschnitten für automatisierte Fahrsysteme an der Gesamtlänge des Strassennetzes von Autobahnen bzw. Autostrassen auf.
- Strassen mit 4 m Breite, also in der Regel weiss markierte Nebenstrassen, weisen mit 12% einen weitaus niedrigeren Anteil gut befahrbarer Strassenabschnitte auf, jedoch sind zumindest 55% der 4 m breiten Strassen bzw. weiss markierten Nebenstrassen gut bis mittel befahrbar.
- Vor allem 8 m und 10 m breite Strassen, also in der Regel blau markierte Hauptstrassen, weisen hingegen mit 48% einen sehr hohen Anteil schlecht befahrbarer Strassenabschnitte an der Gesamtlänge dieses Strassentyps auf.
- Ein im Vergleich hoher Anteil schlecht befahrbarer Strassenabschnitte (21%) zeigt sich ebenso bei den 6 m breiten Strassen, zu denen in der Regel Quartiersstrassen gehören.

Tab. 8 aF-Befahrbarkeit nach Strassentypen

Strassentyp	Bewertung aF-Befahrbarkeit: Anteil an Gesamtlänge des Strassennetzes je Strassentyp				Gesamtlänge des Strassennetzes
	gut	mittel - gut	schlecht - mittel	schlecht	
Autobahnen bzw. Autostrassen	100%	0%	0%	0%	2.702 km
8 m und 10 m Strassen (z.B. blau markierte Hauptstrassen)	5%	19%	29%	48%	3.122 km
6 m Strassen (z.B. Quartiersstrassen)	11%	32%	36%	21%	6.281 km
4m Strassen (z.B. weiss markierte Nebenstrassen)	12%	55%	22%	10%	18.675 km
Kleinere Strassen und Wege	6%	65%	19%	9%	21.568 km

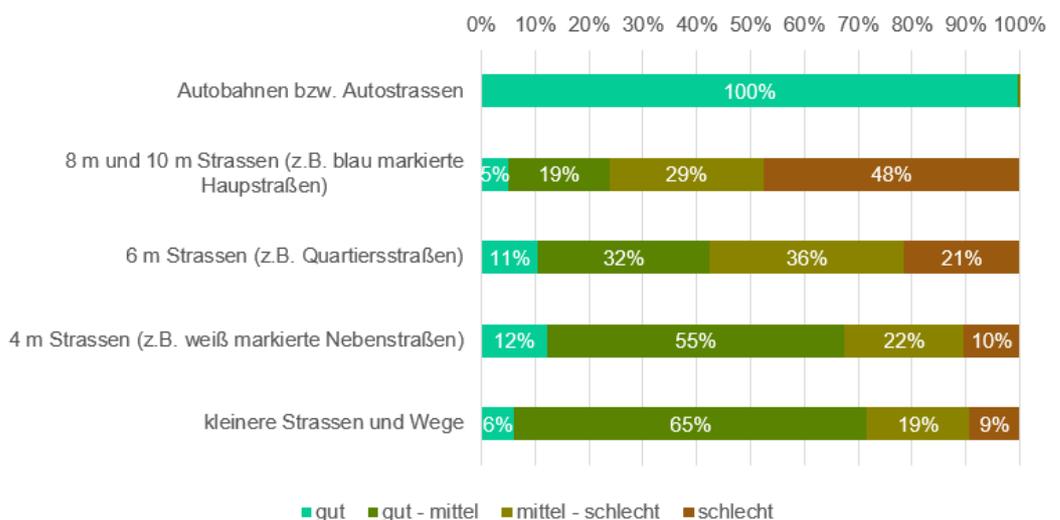


Abb. 26 aF-Befahrbarkeit nach Strassentypen (Anteil an Gesamtlänge des Strassennetzes je Strassentyp)

3.4 Fazit und Schlussfolgerungen

Die Analyse der aF-Befahrbarkeit zeigt eindeutig, dass das RZU-Gebiet hinsichtlich des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge keinen homogenen Raum darstellt, sondern das Strassennetz aus technisch-infrastruktureller Sicht eine sehr unterschiedliche Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge aufweist. Folgende Befunde können dabei für die verschiedenen räumlichen Ebene festgehalten werden:

Makro-Ebene

Vor allem für Autobahnen sowie für Gebiete im Nordosten und Nordwesten von Zürich und dabei speziell für Bereiche in Industriegebieten und an den Stadträndern zeigt sich eine gute Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge. Hingegen ist die Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge speziell im Zentrum von Zürich sowie auch in den Siedlungskernen in peripheren Lagen eher gering.

Meso-Ebene

Auch hinsichtlich der Gebietstypen zeigen sich ähnliche Ergebnisse: Vor allem im Gebietstyp Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss sowie im dichten Mischgebiet mit Autobahnanschluss wurde eine im Vergleich mit anderen Gebietstypen bessere aF-Befahrbarkeit deutlich. Dagegen wies insbesondere der Gebietstyp Innenstadt Zürich einen im Vergleich sehr hohen Anteil schlecht befahrbarer Strassenabschnitte an der Gesamtlänge des Strassennetzes auf. In den Gebietstypen peripheres Zentrumsgebiet, dörfliches Gebiet mit MIV-Orientierung und dörfliches Gebiet mit Bahnanschluss zeigten sich im Vergleich dazu jeweils sehr hohen Anteile von Strassenabschnitten, die durch eine mittlere aF-Befahrbarkeit gekennzeichnet sind.²

Mikro-Ebene

Speziell für unterschiedliche Strassentypen zeigte sich, dass vor allem Autobahnen und Autostrassen mehrheitlich gut befahrbare Strassenabschnitten für automatisierte Fahrsysteme aufweisen, während 8 m und 10 m breite Straßen, in der Regel blau markierte Hauptstraßen durch einen hohen Anteil von schlecht befahrbaren Strassenabschnitten für automatisierte Fahrsysteme gekennzeichnet sind.

Die unterschiedliche aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes bedeutet jedoch auch, dass die Vor- und Nachteile des Einsatzes von automatisierten Fahrzeugen zumindest in naher Zukunft, d.h. in den nächsten Jahren, ungleichmässig verteilt sein werden sowie selektive Verschiebungen der Erreichbarkeit mit automatisierten Fahrzeugen und damit der Lagegunst wahrscheinlich sind (vgl. Soteropoulos 2022: 140) – diese Veränderungen werden anhand der in Kapitel 1 bereits beschriebenen Anwendungsformen kollektiver automatisierter Fahrzeuge im nächsten Kapitel für das RZU-Gebiet näher beleuchtet.

3.5 Limitationen und Forschungsbedarf

Limitation generischer Ansatz

Grundsätzlich sollte, wie bereits eingangs beschrieben, nochmals betont werden, dass die für das gesamte Strassennetz der RZU-Region angewendete Bewertung der aF-Befahrbarkeit ein generischer Ansatz ist. Er bildet die Befahrbarkeit des Strassennetzes ganz generell für automatisierte Fahrzeuge anhand verschiedener Faktoren ab, die die Komplexität automatisierter Fahrzeuge erhöhen. Hierbei wird jedoch nicht die Befahrbarkeit für bestimmte automatisierte Fahrzeuge (z.B. unterschiedliche Sensorik etc.)

² Die Ergebnisse geben dabei insgesamt nur einen Überblick über die Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge aus technisch-infrastruktureller Sicht, was jedoch nichts über die verfügbaren Kapazitäten im Strassennetz aussagt, die hinsichtlich eines möglichen Einsatzes automatisierter Fahrzeuge zusätzlich berücksichtigt werden müssten.

aufgezeigt. Diese Analyse eignet sich daher, wie bereits erwähnt, zwar als Planungsgrundlage, jedoch nicht für den spezifischen Einsatz bzw. die Routenplanung von einzelnen spezifischen automatisierten Fahrzeugen.

Datenseitige Limitationen

Ein weiterer Aspekt, der klarerweise die Genauigkeit der Bewertung der aF-Befahrbarkeit beeinflusst und daher berücksichtigt werden muss, ist die Verfügbarkeit von Daten. Zwar wurde bereits zu Beginn der Analyse mittels Abstimmungen mit der Stadt Zürich und dem Kanton Zürich bestmöglich auf vorhandene Datengrundlagen zur Berechnung der Indikatoren zurückgegriffen. Für eine Verbesserung der Bewertung wären jedoch weitere und genauere Daten zur Abbildung nötig. Für die Abbildung von einigen komplexen Aspekten für automatisierte Fahrzeuge könnten dabei extern vorhandene Datenquellen wie HD Maps, Strassenansichtsdienste (z.B. Google Street View) oder Datensätze von Herstellern helfen, den jeweiligen komplexen Aspekt für automatisierte Fahrzeuge besser in der Bewertung zu berücksichtigen. Für die Abbildung anderer komplexer Aspekte wären Echtzeitinformationen, z.B. über das Vorhandensein verschiedener dynamischer Objekte, über den Zustand der Strasseninfrastruktur sowie über Verkehrsbedingungen (z.B. Bauarbeiten) und Wetterbedingungen nötig, bei denen die Datenverfügbarkeit als deutlich schlechter eingestuft werden kann (vgl. Soteropoulos 2022: 148).

Forschungsbedarf

Daraus leitet sich für zukünftige Analysen weiterer Forschungsbedarf ab, wobei folgende Aspekte dabei im Fokus stehen sollten:

- Die durchgeführte Analyse und Bewertung der Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge stellen nur einen ersten Ansatz für die Bewertung dar, der in zukünftigen Studien weiterentwickelt werden müsste: Um die Genauigkeit der Bewertung zu erhöhen, wäre der Einbezug von weiteren Datenquellen wie insbesondere HD Maps, Datensätzen von Herstellern und Echtzeitinformationen, insbesondere zum Vorhandensein dynamischer Objekte, sowie Verkehrs- und Wetterbedingungen von wichtig.
- Die Berücksichtigung der letztgenannten Echtzeitdaten würde zudem zu einer Bewertung der Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge führen, die sich in Echtzeit, z.B. bei einem Wechsel der Wetterbedingungen, verändern. In Zukunft könnte so eine dynamische bzw. auch tageszeitliche Abbildung der Befahrbarkeit vorgenommen werden, um prinzipielle Unterschiede im Tagesverlauf (z.B. schlechtere Befahrbarkeit bzw. komplexere Bedingungen bei Strassen in der Nähe von Schulen insbesondere bei Beginn und Ende des Unterrichts) aufzuzeigen. Dies könnte dabei helfen, nicht nur mögliche aF-Betriebsgebiete, sondern auch mögliche Betriebszeiten von automatisierten Fahrzeugen (so wie dies beispielsweise schon heute bei den Robotaxis von Cruise in San Francisco, die bislang allein in der Nacht verkehren, gemacht wird) zu diskutieren und festzulegen (vgl. Hope 2022).
- Zudem sollten die für die Bewertung der Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge verwendeten Indikatoren in zukünftigen Arbeiten auf Basis technologischer Entwicklungen im Bereich der Sensoren oder der Software automatisierter Fahrsysteme (Berücksichtigung der fortschreitenden technologischen Entwicklung, Erlernen komplexer Szenarien durch Realbetrieb oder in der Simulation) weiter angepasst werden, um in der Bewertung mit den technologischen Entwicklungen bei automatisierten Fahrsystemen Schritt zu halten.

4 Erreichbarkeitsanalyse für kollektive automatisierte Angebotsformen

4.1 Einleitung und Stand der Forschung

Die verkehrlichen (und räumlichen) Effekte automatisierter Fahrzeuge wurden in den letzten Jahren auch in der Schweiz in zahlreichen Studien erforscht. Eine detaillierte Betrachtung von kollektiv genutzten automatisierten Fahrzeugen (z.B. automatisierte Shuttles, Taxis etc.) als spezifische Ergänzung zum bestehenden öffentlichen Verkehr fand bislang nur vereinzelt statt. Unberücksichtigt blieb in diesen Studien bislang die technisch-infrastrukturellen aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes von Städten und Agglomerationen sowie der Umstand, dass sich ausgehend davon auch kollektive Fahrzeuge zunächst nicht in einem gesamten Gebiet, sondern allein in bestimmten oder freigegebenen Strassen bzw. Teilgebieten unterwegs sein könnten (Level 4).

Um sich dieser Thematik im Rahmen des Projekts anzunähern wurde die Methode einer Erreichbarkeitsanalyse bzw. -modellierung gewählt, die in der Studie von Frick et al. (2015) für unterschiedliche Verkehrsmodi wie Fuss, Velo, MIV und ÖV für die Schweiz zur Anwendung kam. Erreichbarkeit bezeichnet die Standortqualität eines Raumpunktes, die sich aus seinen verkehrlichen Beziehungen zu anderen Raumpunkten (meist ausgedrückt in Reisezeiten) und deren Attraktionspotenzial ergibt (z.B. Einwohner oder Arbeitsplätze). Es handelt sich somit um eine Potenzialoptik (vgl. Frick et al. 2015: 21).

Im Rahmen des Projekts wurde aufbauend auf Frick et al. (2015) die Veränderung der Erreichbarkeit im öffentlichen Verkehr untersucht, wenn kollektive automatisierte Fahrzeuge als Zubringer eingesetzt werden, wobei die durchgeführte und in Kapitel 3 beschriebene Bewertung der technisch-infrastrukturellen Eignung bzw. Befahrbarkeit des Strassennetzes dabei als Raumwiderstand für die Erreichbarkeitsberechnung herangezogen wurde. Die Ergebnisse der durchgeführten Erreichbarkeitsmodellierung sind letztlich Erreichbarkeitspotenziale (vgl. Schwarze 2015: 58 f) von Einwohner:innen und Arbeitsplätzen sowohl für den derzeit bestehenden öffentlichen Verkehr im RZU-Gebiet als auch für einen um kollektive automatisierte Fahrzeuge als Zubringer zu bestehenden Haltestellen ergänzten öffentlichen Verkehr. Die zentrale Grösse ist hierbei die räumlich differenzierte Betrachtung der Veränderung der Erreichbarkeitspotenziale im öffentlichen Verkehr ohne und mit den kollektiven automatisierten Fahrzeugen als Zubringer.

Tab. 9 Vergleich zwischen Erreichbarkeitsmodell und Verkehrsnachfragemodell (modifiziert nach Peter 2021:51)

	Erreichbarkeitsmodell	Verkehrsnachfragemodell
Fokus	Einfachheit von Ortsveränderungen	Prognose von Ortsveränderungen
Beispiel	Reisezeit der Einwohner zum nächsten Hausarzt	Prognose der Nachfrage einer neuen Buslinie
Grundlage	Verteilung von Gelegenheiten, Raumwiderstände auf Verkehrsgraphen	Erreichbarkeiten, Personenmerkmale, Verhalten, Landnutzungen, Kapazitäten
Raumbezug	Raster, administrative Gebiete, Verkehrszellen	Verkehrszellen, Agenten, Personengruppen
Aggregation	Gering	Gering bis hoch
Ressourcenbedarf	Gering bis hoch	Hoch

Exkurs: Abgrenzung zu Verkehrsnachfragemodellierungen

Die Untersuchung der Effekte von automatisierten Fahrzeugen auf die Erreichbarkeit bzw. deren verkehrliche und (räumliche) Wirkungen in Form von Erreichbarkeitsmodellierungen wurde bislang nur in sehr wenigen Studien durchgeführt. Stattdessen griffen Studien für

die Untersuchung verkehrlicher (und räumlicher) Wirkungen automatisierter Fahrzeuge vor allem auf makroskopische Verkehrsnachfragemodelle bis hin zu agentenbasierten Modellen wie beispielsweise MATSim zurück (vgl. Soteropoulos et al. 2019). Auch für die Schweiz bzw. für einzelne Städte in der Schweiz wurden in der Vergangenheit solche Simulationsstudien zu den verkehrlichen Wirkungen automatisierter Fahrzeuge durchgeführt (siehe Tab. 10 für einen Überblick). Verkehrsnachfragemodelle liefern Aussagen u.a. zu Verkehrsstärken auf Netzelementen sowie zu Kenngrößen des Verkehrsaufwands wie Personenkilometer oder Fahrzeugkilometer (vgl. Friedrich et al. 2017: 3) und unterscheiden sich damit deutlich von den im Rahmen von Erreichbarkeitsmodellierungen ermittelten Erreichbarkeitspotenzialen.

Tab. 10 Übersicht von Studien zur Untersuchung der verkehrlichen Wirkungen in der Schweiz

Räth et al. 2021	Zürich und Umgebung	MATSim Verkehrsmodell
Hörl et al. 2020	Zürich	MATSim Verkehrsmodell
Axhausen et al. 2020	Schweiz und drei Raumtypen	MATSim Verkehrsmodell
Livingston et al. 2020	Zürich, Chur und Fribourg	MATSim Verkehrsmodell
Perret et al. 2020	Schweiz	Szenario-Entwicklung
Hörl et al. 2019	Zürich (12 Kreise)	MATSim Verkehrsmodell
Boesch et al. 2018	Zug	MATSim Verkehrsmodell
Meyer et al. 2017	Schweiz	Makroskopisches Verkehrsnachfragemodell
Perret et al. 2017	Schweiz	Bericht, Literaturrecherche, Storyline-Entwicklung
Boesch et al. 2016	Zürich	MATSim Verkehrsmodell

Die Vielzahl dieser bisherigen Simulationsstudien untersuchte dabei die Wirkungen automatisierter Fahrzeuge, wenn diese in einer gesamten Stadt bzw. in der gesamten Schweiz (Level 5) verkehren. Beispielsweise wurden durch Hörl et al. (2020) die verkehrlichen Wirkungen kollektiver automatisierter Fahrzeuge in Zürich untersucht. Im Rahmen des Teilprojekt 2 des Projekts «Auswirkungen des automatisierten Fahrens» des ASTRA (vgl. Axhausen et al. 2020) wurden zudem auch verschiedene Szenarien mit automatisierten Fahrzeugen modelliert, wobei als Inputs hierzu auch die Berücksichtigung von unterschiedlichen Teilnetzen dienten, auf denen automatisierte Fahrzeuge verkehren. So wurden als Input für die Szenarien unterschiedliche Strassenfreigaben aus dem Teilprojekt 5 (vgl. Busch et al. 2020) genutzt, wobei automatisierte Fahrzeuge im Jahr 2030 vorrangig auf Autobahnen, im Jahr 2040 vorrangig sowohl auf Autobahnen als auch auf Stadtstrassen und im Jahr 2050 auf Autobahnen, Stadtstrassen und Landstrassen verkehren – hier wurden die Strassenfreigaben also grob anhand der Strassentypen festgelegt (vgl. Busch et al. 2020: 84). Neben privaten automatisierten Fahrzeugen wurden hier auch Szenarien mit privaten automatisierten Fahrzeugen gemeinsam mit automatisierten Taxis modelliert (vgl. Axhausen et al. 2020: 70 f). Räth et al. 2021 untersuchten im Rahmen eines von zwei definierten Szenarien mittels MATSim auch die Wirkungen kollektiv genutzter automatisierter Fahrzeuge, die allein in schlecht bzw. mässig, nicht jedoch in sehr gut durch den öffentlichen Verkehr erreichbaren Teilen von Gebieten verkehren.

Auch in den bisherigen Simulationsstudien fand bis heute keine detaillierte Betrachtung von kollektiv genutzten automatisierten Fahrzeugen (z.B. automatisierte Shuttles, Taxis etc.) als spezifische Ergänzung zum bestehenden öffentlichen Verkehr inklusive einer Berücksichtigung der technisch-infrastrukturellen Befahrbarkeit des Strassennetzes von Städten statt. D.h. der Umstand, dass sich ausgehend davon auch kollektive Fahrzeuge zunächst nicht in der gesamten Stadt, sondern allein in bestimmten oder freigegebenen Strassen bzw. Gebieten unterwegs sein könnten (Level 4), blieb in den bisherigen Simulationsstudien unberücksichtigt.

4.2 Methodik

4.2.1 Aufbau Erreichbarkeitsmodell

Im Rahmen des Projekts wurde der Einsatz einfacher Erreichbarkeitsmodelle fokussiert. Ziel ist am Ende die Standortqualität eines Raumpunktes abzubilden, die sich aus seinen verkehrlichen Beziehungen zu anderen Raumpunkten (ausgedrückt durch Reisezeiten) und deren Attraktionspotenzial (Einwohner oder Arbeitsplätze) ergibt.

Die Erschliessungsqualität ist im Rahmen der Studie allerdings selbst kein Zielsystem – die Diskrepanz wird später in der Konkurrenz von automatisierten Angebotsformen zu Fuss- und Veloverkehr sichtbar. Neben weiterer aktueller Literatur basieren viele Überlegungen der Erreichbarkeitsmodellierung auf dem Grundlagenbericht zu „normierten gesamtverkehrlichen Erschliessungsqualitäten“ aus dem Jahr 2015 (Frick et al., 2015).

Für den Aufbau einfacher Erreichbarkeitsmodelle müssen grundsätzlich folgende Datengrundlagen vorhanden sein:

Verkehrsgraph: Ein topologisches Netz aus Knoten und Kanten beschreibt das jeweilige Verkehrssystem und beinhaltet Informationen zu Raumwiderständen.

Quellen und Ziele: Verortete Punktdaten, welche Basis für die relationale Betrachtung der Fahrzeiten sind. Dies sind einerseits Raumeinheiten (z.B. Rasterzellen) als Quellpunkte und andererseits Gelegenheiten im Raum (z.B. Bevölkerung und Beschäftigte)

Ziel ist die Abbildung des **Erreichbarkeitspotenzials** als **Potenzialindikator**. Damit ist es möglich, die Standortbedingungen eines Punktes über die Menge der erreichbaren Gelegenheiten zu bestimmen und diese über Raumwiderstände zu gewichten. Die Gewichtung folgt der Idee, dass die Interaktionswahrscheinlichkeit mit zunehmender Fahrzeit sinkt. Von den Raumeinheiten erreichbare Gelegenheiten im Raum mit kürzerer Fahrzeit werden so höher gewichtet als jene mit hohen Fahrzeiten. (Peter 2021:123)

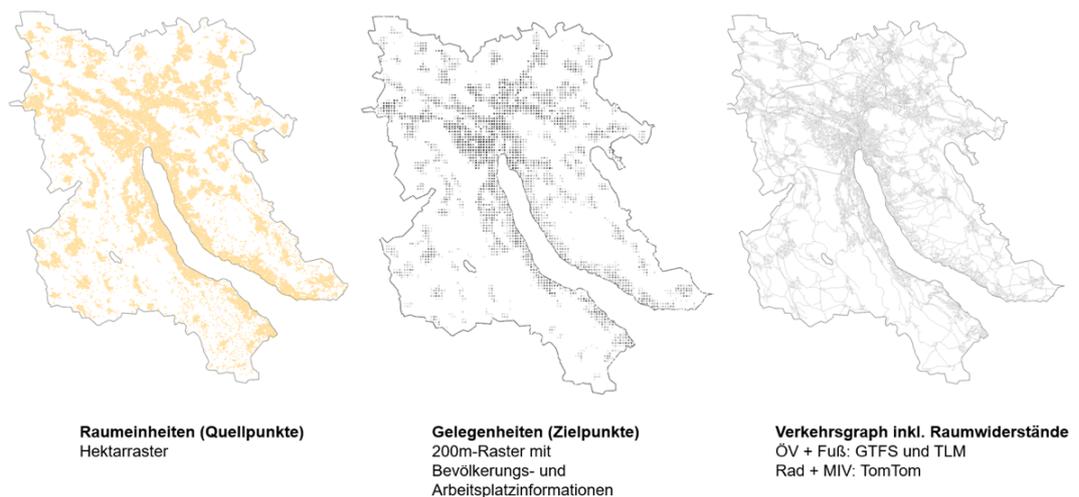


Abb. 27 Für das Erreichbarkeitsmodell notwendige und verwendete Informationen

4.2.2 Verwendete Datengrundlagen

Die verwendeten Datengrundlagen sind in folgender Tabelle 11 aufgelistet. Von Bedeutung ist jeweils auch das Referenzjahr der verwendeten Daten. Dieser Umstand begründet, dass teilweise grössere in Planung, in Bau befindliche bzw. teilweise bereits

abgeschlossene Infrastrukturprojekte (z.B. Limmattalbahn) und deren Auswirkungen im Rahmen der durchgeführten Analyse nicht berücksichtigt werden konnten.

Allgemein wurde versucht, je Modi und Thema möglichst aktuelle Datensätze zu verwenden. Dies begründet den Umstand, dass in der Erreichbarkeitsmodellierung Datensätze aus unterschiedlichen Jahren (jeweils die aktuellsten) verwendet wurden. Infrastrukturelle Kompatibilitätsproblematiken wurden im Zuge der Bearbeitung besprochen und stellten im Fokus der gesamtäumlichen Betrachtung kein Hindernis dar.

Tab. 11 Verwendete Datengrundlagen je Modi

Thema	Verwendeter Datensatz	Jahr	Quelle
Routing-Grundlage Fussverkehr und Fusswege in intermodalem ÖV-Routing	TLM	2022	Bundesamt für Landestopografie swisstopo
Routing-Grundlage Veloverkehr	Netz GVM-ZH (Grundlage TomTom)	2019	Zur Verfügung gestellt von Kanton Zürich, Amt für Mobilität
Routing-Grundlage MIV	Netz GVM-ZH (Grundlage TomTom)	2019	Zur Verfügung gestellt von Kanton Zürich, Amt für Mobilität
Routing-Grundlage ÖV	GTFS Maschinienlesbare Fahrplandaten	Fahrplanjahr 2022	opentransportdata.swiss, Geschäftsstelle SKI
kleinräumige Bevölkerungsdaten Quellen u. Ziele für Routing	Statistik der Bevölkerung und der Haushalte - Hektarraster	2020	Geodaten der Bundesstatistik, Statistik der Bevölkerung und der Haushalte, http://www.geostat.admin.ch
kleinräumige Arbeitsplatzdaten (Anzahl Beschäftigte) Ziele für Routing	STATENT – Statistik der Unternehmensstruktur, Adressbasiert	2019	Bundesamt für Statistik, Statistik der Unternehmensstruktur (STATENT) 2019

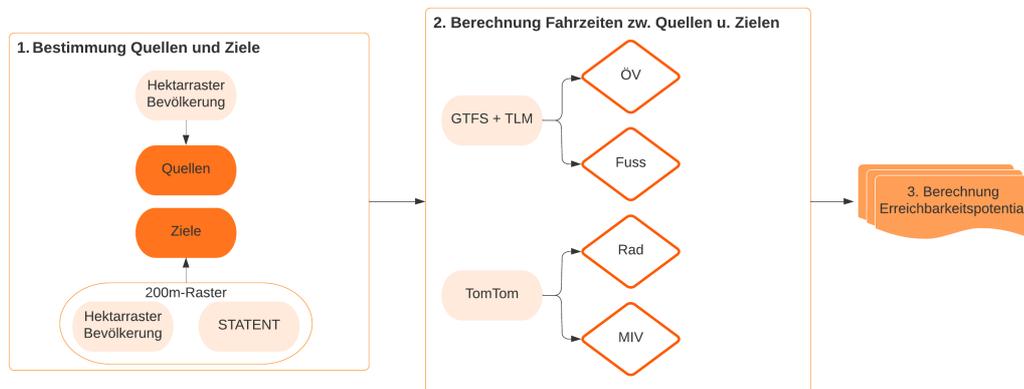


Abb. 28 Schematische Darstellung des Ablaufs der durchgeführten Erreichbarkeitsanalyse für die Modi ÖV, Fuss, Velo und MIV

4.2.3 Bestimmung der Quellen und Ziele des Erreichbarkeitsmodells Zielpunkte (Gelegenheiten)

Auf Basis des Hektarrasters mit Bevölkerungsinformation und der STATENT-Daten mit adressbasierten Unternehmensdaten wurde ein 200 m-Raster hochaggregiert. Dessen Referenzpunkt für die spätere Berechnung der Erreichbarkeit (=Zielpunkt) ist aber nicht der Rasterzellenmittelpunkt, sondern ein geometrisch gewichteter Referenzpunkt, wobei die geometrischen Gewichte die Anzahl der Personen (Hektarraster) und Anzahl der Arbeitsplätze (STATENT) darstellen.

Um die Ergebnisse in Randbereichen des Analysegebiets nicht zu verfälschen, wurden die Zielpunkte für die gesamte Schweiz aufbereitet. Die Analyse ist aber durch die Datenverfügbarkeit des zur Verfügung gestellten TomTom-Graphens in ihrer Ausdehnung begrenzt (siehe Abb. 31).

Das Beispiel in Abb. 29 (links) zeigt eine blau umrahmte 200x200 m grosse Rasterzelle: In blauen Punkten dargestellt ist der Hektarraster in Form von Hektarraster-Mittelpunkten – je dunkelblauer desto mehr Personen leben in der jeweiligen 100x100 m Rasterzelle. In einer Gelb-Rot Skala dargestellt sind die Anzahl der Beschäftigten auf STATENT-Basis – je stärker rot desto mehr Beschäftigte. Auf Basis dieser beiden Informationen wurde ein geometrischer Mittelwert berechnet (grüner Punkt). Dieser liegt nicht im Mittelpunkt der Zelle, sondern wird durch die höhere Anzahl an Personen und Beschäftigten im Südwesten der Zelle dorthin verlagert. Dieser Vorgang hilft vor allem in Siedlungsrandbereichen bzw. heterogen bebauten Bereichen, exaktere Ergebnisse bei der Berechnung der Erreichbarkeiten zu erhalten.

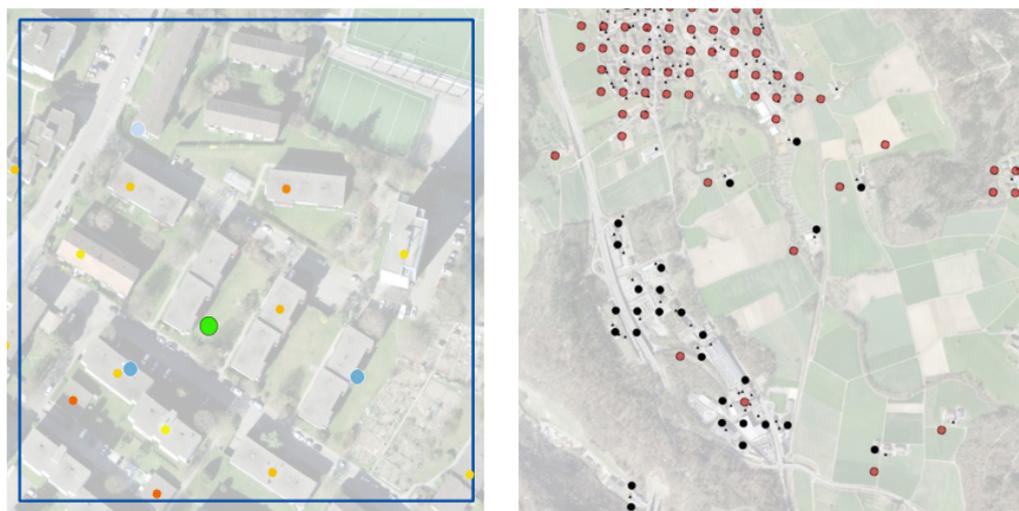


Abb. 29 Links: Geometrischer gewichteter Zielpunkt (grüner Punkt), Rechts: Quellpunkte HWS (Rot) und ergänzende Betriebsinformationen (Schwarz)

Quellpunkte (Raumeinheiten)

Auf Quellseite wird für die Erreichbarkeitsmodellierung der Hektarraster mit Bevölkerungsinformation verwendet. Dies bedeutet, dass für jeden Punkt des 100x100 m-Rasters ein Erreichbarkeitspotenzial berechnet wird.

Da in den verwendeten Gebietstypen auch Räume charakterisiert werden, welche mehrheitlich einer industriellen und/oder gewerblichen Nutzung unterliegen, wurde der Bevölkerungs-Hektarraster mit den in STATENT verfügbaren Information der Anzahl Beschäftigten ergänzt. Als Ergebnis liegen auch in Räumen ohne Wohnnutzung aber mit industrieller bzw. gewerblicher Nutzung Quellpunkte vor, für die ebenfalls das Erreichbarkeitspotenzial bestimmt wird.

Das Beispiel in **Abb. 29** (rechts) zeigt den Bevölkerungs-Hektarraster (rote Punkte), die adressbasierten Daten zu Arbeitsplätzen auf Basis des STATENT (kleine schwarze Dreiecke) sowie die ergänzten Quellpunkte im Hektarraster (schwarze Punkte).

Aufgrund der zahlreichen Wohn- und Gewerbebauten ausserhalb des Siedlungsgebietes wird für die Analyse ein deutlich grösseres Gebiet verwendet, als im RZU-Gebiet als Bauzone bzw. Siedlungsgebiet ausgewiesen ist. Dadurch können später auch die Wirkungen auf die Bauten ausserhalb der Bauzone abgeschätzt und Schlussfolgerungen bezüglich der Erreichung der raum- und verkehrsplanerischen Ziele gezogen werden. Eine

Reduzierung der Quell- und Zielpunkte auf das Siedlungsgebiet würde zu einer Verfälschung der Aussagen führen.

Tab. 12 Zusammenfassende Übersicht Quell- und Zielpunkte

	Quellpunkte	Zielpunkte
Räumliche Auflösung Raster	100 Meter	200 Meter
Bevölkerungsinformation	Ja, besiedelte Zellen	Ja, aus Hektarraster aggregiert
Betriebsinformation	Ja, Zellen mit verorteten Unternehmensstandorten	Ja, aus STATENT aggregiert

4.2.4 Berechnung der Fahrzeiten Fuss, Velo, ÖV und MIV

Für die Modellierung der Erreichbarkeiten als Basis der Berechnung der Fahrzeiten der unterschiedlichen Modi wurden in ArcGIS Pro unter Nutzung der Network Analyst Extension zwei Netzwerkgraphen aufgebaut:

Netzwerkgraph Velo und MIV: Auf Basis des zur Verfügung gestellten TomTom-Exports wurde ein routingfähiger Netzwerkgraph für die Individualverkehrsmodi Veloverkehr und motorisierter Individualverkehr (MIV) aufgebaut. In diesem Export sind unterschiedliche Attribute mit Informationen zu Geschwindigkeiten (nach Tageszeit und Wochentag) sowie Einbahnregelungen und Fahrtverboten enthalten. Über diese Geschwindigkeiten können unterschiedliche Kantenbelastungen abgebildet werden – z.B. ist die Fortbewegung mit dem Auto in den Nachtstunden meist wesentlich flotter als zur Morgenspitze an einem Werktag. Diese Informationen stellen aber lediglich eine Annäherung dar. Zusätzlich wurde ein sog. TurnTable zur Verfügung gestellt, über welchen die Abbiegerelationen (Verbote oder Gebote z.B. für Linksabbiegen) im Graphen abgebildet werden können. Während für den Veloverkehr Informationen zu Durchschnittsgeschwindigkeiten im Datensatz nicht verfügbar sind, enthält der TurnTable auch Velo-Relevante Abbiegerelationen. Aus diesem Grund wurde der Veloverkehr ebenfalls über den TomTom-Export modelliert.

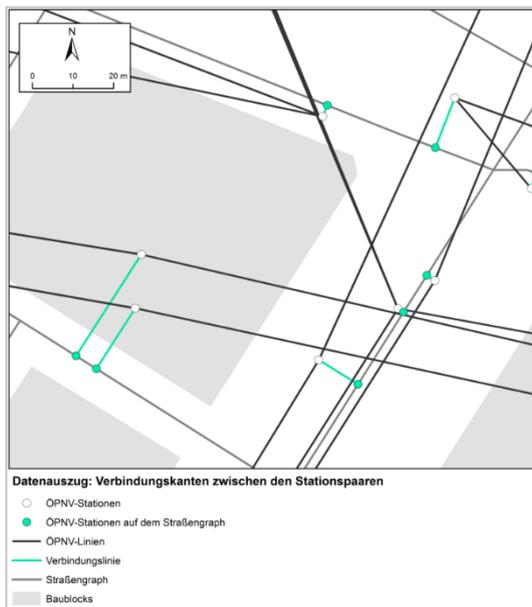


Abb. 30 Schematische Darstellung der Verknüpfung von GTFS und Strassenkanten (Quelle: Gidam 2019)

Netzwerkgraph Fuss und ÖV: Auf Basis des frei verfügbaren TLM und maschinenlesbarer Fahrplandaten im Format GTFS wurde ein fahrplanfeiner routingfähiger Netzwerkgraph für die Modi Fussverkehr und ÖV aufgebaut. GTFS (General Transit Feed Specification) ist ein digitales Standardformat zur Abbildung

maschinenlesbarer Informationen im ÖV-System. Kernelement sind Fahrplandaten, welche gemeinsam mit räumlichen Informationen zu Stationen ein relationales Netz abbilden, das für Erreichbarkeitsanalysen direkt in ArcGIS Pro genutzt werden kann. Im Unterschied zu ÖV-Güteklassen können so auch Relationen in Analysen berücksichtigt werden, was bei der Berechnung von Erreichbarkeitspotenzialen und damit notwendigen relationalen Reisezeiten von Vorteil ist. Ergebnis ist ein zeitgebundener und fahrplanfeiner ÖV-Graph. Um diesen routingfähig zu betreiben ist als zweite Information ein Graph notwendig, über welchen die Fusswegeverbindungen abgebildet werden können. Im Rahmen des Projekts wurde hierfür das TLM verwendet, da dieses sehr detaillierte und kleinräumige Wegeverbindungen erfasst, was vor allem beim distanzsensiblen Fussverkehr von grosser Bedeutung ist (beispielsweise Abkürzungen durch Grünflächen, Hausdurchgänge, etc.). Beim Aufbau des ÖV-Routings wurde der GTFS-Graph und der Fusswegegraph (TLM) in einem weiteren Arbeitsschritt im Bereich der Stationen über Hilfskanten verbunden. Diese Hilfskanten bilden in weiterer Folge die Zustiege in das ÖV-System ab (siehe Abb. 30).

Iterative, fahrplanfeine Erreichbarkeitsmodellierung im ÖV

Bei Analyseaufgaben auf Basis von Fahrplaninformation ist die Angabe eines Startzeitpunkts (in Form von Uhrzeit und Datum) von Bedeutung – durch den Fahrplan liefert eine Analyse der Fahrzeit von A nach B um 08:00 andere Ergebnisse als beispielsweise 3 Minuten später um 08:03, da möglicherweise Fahrten knapp erreicht bzw. verpasst werden oder zu diesem Zeitpunkt andere Fahrtkombinationen (Umsteigerelationen) möglich sind. Dieser Effekt beeinflusst vor allem in Gebieten mit weniger dichten Taktfolgen das Ergebnis: wird z. B. an einem Bahnhof mit 30-Minuten-Takt eine Fahrt knapp um 3 Minuten verpasst, enthält die berechnete Gesamtfahrzeit eine Wartezeit von 27 Minuten auf die nächste Verbindung, was das Analyseergebnis dementsprechend beeinflusst. Um diesen Effekt zu minimieren, wurden im Rahmen des Projekts sämtliche Analysen, die ganz oder teilweise auf ÖV-Zeiten basieren (also auch alle automatisierten Angebotsformen), in knapp aufeinanderfolgenden Abständen von 9 Minuten für insgesamt sieben Startzeitpunkte werktags zwischen 07:00 und 07:54 wiederholt. Diese sieben Ergebnisse wurden in einem weiteren Schritt aggregiert und für jede Relation sowohl die minimale ÖV-Fahrzeit (inkl. Zu- und Abgangswege) als auch die durchschnittliche ÖV-Fahrzeit (ebenfalls inkl. Zu- und Abgangswege) gespeichert und weiterverarbeitet. Das folgende Beispiel illustriert diesen Analyseschritt:

Tab. 13 Beispiel für die iterative Berechnung der ÖV-Fahrzeit

Beispielrelation	Analysezeitpunkt/Startzeitpunkt	Kürzeste Fahrzeit
Quellpunkt 1 – Zielpunkt 13	07:00 Uhr	21:23 min
Quellpunkt 1 – Zielpunkt 13	07:09 Uhr	23:01 min
Quellpunkt 1 – Zielpunkt 13	07:18 Uhr	19:54 min
Quellpunkt 1 – Zielpunkt 13	07:27 Uhr	17:43 min
Quellpunkt 1 – Zielpunkt 13	07:36 Uhr	20:43 min
Quellpunkt 1 – Zielpunkt 13	07:45 Uhr	19:23 min
Quellpunkt 1 – Zielpunkt 13	07:54 Uhr	22:13 min
Aggregat Relation 1 – 13		
Minimale Fahrzeit	17:43 min	
Durchschnittliche Fahrzeit	20:37 min	

Für die in Tab. 13 gezeigte Beispielrelation 1 – 13 wurde die Fahrzeit insgesamt sieben Mal zu den gezeigten Analysezeitpunkten im Abstand von 9 Minuten berechnet. Die jeweils gemessenen kürzesten Fahrzeiten unterschieden sich fahrplan- und wartezeitenbedingt je Analysezeitpunkt. In einem weiteren Schritt werden sämtliche gemessenen Fahrzeiten aggregiert, sodass die minimale Fahrzeit und durchschnittliche Fahrzeit übrigbleiben. In weiterer Folge wurde die minimale Fahrzeit für die Berechnung des

Erreichbarkeitspotenzials herangezogen. Diese Entscheidung begründet sich mit der Annahme, dass Personen, die den ÖV nutzen, ihren Reisezeitpunkt (möglichst) nach dem Fahrplan optimieren, um Wartezeiten so weit als möglich zu reduzieren.

Routingwiderstände

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über ausgewählte zur Verfügung stehende Routingwiderstände, die für Erreichbarkeitsmodellierungen verwendet werden können. Aufgrund der Entscheidung ein einfaches Erreichbarkeitsmodell zu modellieren, erfolgte die Wahl der Reisezeit als Routingwiderstand (fett hervorgehoben).

Tab. 14 Routingwiderstände und deren Verwendung im Kontext der Modellierung (vgl. Friedrich 2003, Peter 2021)

Routingwiderstand	Routenoptimierung	Im Projekt verwendet für Modus
Distanz (m)	Kürzeste Route auf Basis Entfernung	Nicht verwendet
Reisezeit	Kürzeste Route auf Basis Zeit	Fussverkehr, Veloverkehr, MIV, ÖV
Attraktivität des Verkehrsmittels	Berücksichtigung von Qualitäts- und Komfortindikatoren	Nicht verwendet
Umsteighäufigkeit	Reduktion der notwendigen Umstiege durch teilweise längere Routen	Nicht verwendet
Kosten	Günstigste Route	Nicht verwendet
CO2-Ausstoß	Route mit geringstem CO2-Ausstoß	Nicht verwendet

Kenngößen des Routingwiderstands «Reisezeit»

Als Reisezeit kann allgemein die für die zurückgelegte Strecke benötigte Zeitdauer verstanden werden – wobei diese auch weitere Parameter wie Zu- und Abgangszeiten miteinschließt (siehe Tab. 15). Aufgrund fehlender verfügbarer Daten wurden für die Modi MIV und Veloverkehr aber keine Zu- und Abgangszeiten modelliert. Es ist also zu beachten, dass vor allem beim MIV die Fahrzeiten unterschätzt werden, da Zeiten z. B. für die Parkplatzsuche oder den Weg zum Fahrzeug nicht berücksichtigt werden.

Beim ÖV wurde hingegen eine ganze Reihe an zusätzlichen Kenngößen modelliert. Der ÖV dient später einerseits als Vergleichsbasis der berechneten Erreichbarkeitspotenziale zu automatisierten Angebotsformen und ist außerdem integraler Bestandteil der modellierten automatisierten Varianten.

Tab. 15 Kenngrößen des Routingwiderstands «Reisezeit» bei ÖV (vgl. Friedrich 2003)

Parameter	Definition	Modelliert (Ja/Nein)
Zugangszeit	Gehzeit Quelle – Haltestelle	Ja
Abgangszeit	Gehzeit Haltestelle – Ziel	Ja
Fahrzeit	Fahrzeit im Verkehrsmittel	Ja (Fahrplanfein gem. GTFS-Daten)
Startwartezeit	Wartezeit Starthaltestelle	Indirekt durch iteratives Verfahren
Umsteigewartezeit	Wartezeit zwischen Ankunft und Abfahrt an einer Umsteigehaltestelle	Ja (Fahrplanfein gem. GTFS-Daten)
Umsteigegehzeit	Gehzeit für Fußwege zwischen zwei Umsteigepunkten	Nein
Beförderungszeit (gewichtet)	Empfundene Reisezeit als lineare, gewichtete Kombination der Parameter	Nein

Festlegung der Raumwiderstände

Der Raumwiderstand bei der Berechnung der Fahrzeiten zwischen den Quell- und Zielpunkten wird durch die (kantenweise) Geschwindigkeit je Verkehrsmittel determiniert (siehe Tab. 16). Beim öffentlichen Verkehr wird die Geschwindigkeit fahrplanfein auf Basis der GTFS-Daten modelliert. Die für die Modi Fuss- und Veloverkehr verwendeten Werte beruhen auf dem genannten Grundlagenbericht Frick et al. 2015, die des MIV auf den datenseitig verfügbaren Werten (z. B. MIV-Geschwindigkeiten im TomTom-Export).

Tab. 16 verwendete Kantengeschwindigkeit bei Optimierung der Route nach Fahrzeit

Modus	Geschwindigkeit (Raumwiderstand)	Zusätzlich Informationen	Koeffizient $\text{Beta}_{\text{Modi}}$ (siehe Formel 1)
Fussverkehr	5 km/h	Kein Gehen auf Autobahnen/Schnellstrassen (TLM VERKEHRSBD=1)	-0,12
Veloverkehr	15 km/h	Fahrverbote (inkl. Einbahnen) sowie Abbiege- und verbote für Veloverkehr laut TomTom Keine Zeiten für Zu- und Abgänge modelliert (Abstellzeiten, ...)	-0,1
MIV	Geschwindigkeitsprofil lt. TomTom 07:00-08:00 Werktag	Fahrverbote (inkl. Einbahnen) sowie Abbiege- und verbote für MIV laut TomTom Startpunkte für Erreichbarkeits-Relationen nur im niederrangigem Strassennetz (Snapping) Keine Parkplatzsuchzeiten modelliert	-0,05
ÖV	Fahrplanfein - Geschwindigkeit laut Fahrplan 2022 Gesamtschweiz Zu- und Abgangswege: 5 km/h Fussweg	Kein Gehen auf Autobahnen/Schnellstrassen (TLM VERKEHRSBD=1)	-0,032

Darüber hinaus erfolgte die Einordnung in andere in der Literatur genannten und verwendeten Werte (z.B. Peter 2021, Bartels & Erbsmehl 2014, Weidmann 1993) Zudem wurden je Modi weitere Informationen verarbeitet – meist in Form von Restriktionen, z.B. um das Gehen auf der Autobahn zu unterbinden. Der in der Tabelle je Modi ersichtliche Koeffizient wird in weiterer Folge im Zuge der Potenzialberechnung verwendet.

4.2.5 Berechnung Erreichbarkeitspotenzial Fuss, Velo, ÖV und MIV

Für die Potenzialberechnung wurden die eingangs beschriebenen Quellen (Hektarrasterpunkte) und Ziele (200 m-Raster mit Bevölkerungs- und Arbeitsplatzinformation) verwendet. Die Analyse wurde für das gesamte RZU-Gebiet durchgeführt, wobei die Relationen durch das Untersuchungsgebiet begrenzt waren. Die Notwendigkeit zur Begrenzung musste aufgrund der räumlichen Ausdehnung des zur Verfügung gestellten TomTom-Graphens (schwarze Linien in Abb. 31) vorgenommen werden. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass sog. Randeffekte auftreten werden, wobei sich diese im Bereich des RZU-Gebiets (orange) sehr geringhalten und keinen Einfluss auf das Endergebnis haben. Um die Vergleichbarkeit aller Modi später zu gewährleisten, bestimmte die grösste Limitation die geringste Ausdehnung. Dies hat zur Folge, dass auch das für die Gesamtschweiz zur Verfügung stehende ÖV-Netzwerk nur im Bereich der räumlichen Ausdehnung des TomTom-Netzwerks angewendet wurde.

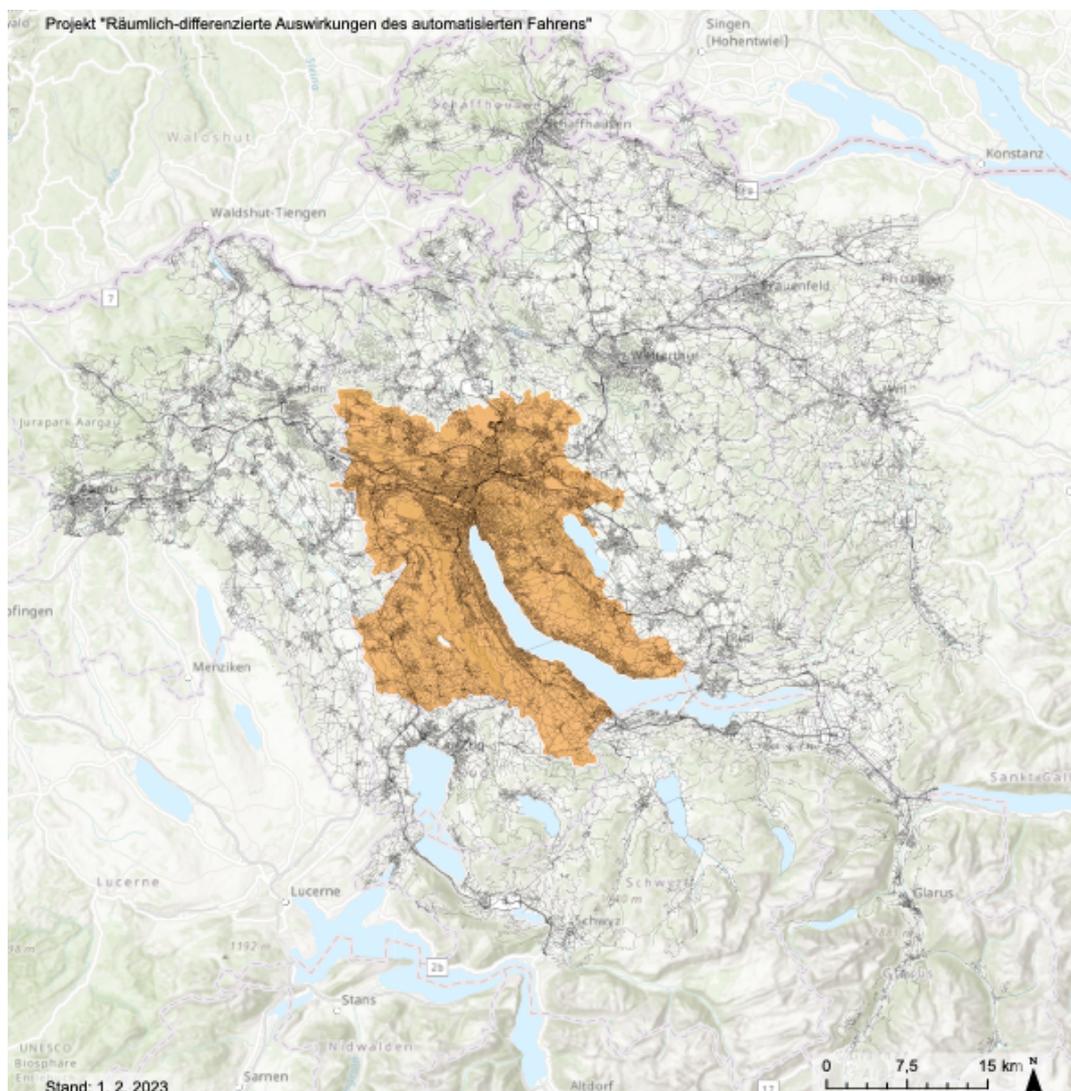


Abb. 31 Ausdehnung des RZU-Gebiets (Orange) und des TomTom-Netzwerks (schwarz)

Für die Berechnung der Potenziale selbst wurde analog zu Frick et al. 2015 vorgegangen:

Für alle Hektarrasterpunkte i im Untersuchungsgebiet wurden Reisezeitsummen “ t_{ij} ” zu allen erreichbaren Zielen j berechnet. Dies wurde über die Erstellung von OD-Matrizen mit der Network Analyst Extension in ArcGIS Pro realisiert.

Das Erreichbarkeitspotenzial selbst wurde in einem weiteren Schritt gemäss folgender Formel berechnet: (Frick et al. 2015:105 ff.)

Formel 4: Erreichbarkeitspotenzial

$$P_{Modi,i} = \sum_{j=1}^n (e^{\beta_{Modi} * t_{ij}}) * (EW_j + \frac{1}{2} * AP_j)$$

wobei:

- n = Zahl der Zielpunkte j im Betrachtungsperimeter des Quellpunkts i
- β_{Modi} = Koeffizient des Modi (siehe Tab. 16)
- t_{ij} = Reisezeit von Quellpunkt i zu Zielpunkt j
- EW_j = Anzahl der Einwohner am Zielpunkt j
- AP_j = Anzahl der Arbeitsplätze am Zielpunkt j

Die in der Tab. 16 angeführten Koeffizienten wurden aus dem Grundlagenbericht entnommen und anhand des Fallbeispiels RZU neu kalibriert, wobei hier nur minimale Änderungen notwendig waren. Die Koeffizienten wurden so bestimmt, dass ab einer Fahrtdauer, die 95 % der Fahrten nicht überschreiten (Grenzwert), die angeführte Exponentialfunktion 0 ergibt. Diese Grenzwerte liegen bei 60 Minuten beim MIV, 29 Minuten beim Veloverkehr, 95 Minuten beim ÖV und 24 Minuten beim Fussverkehr.

Als Ergebnis liegen nun die Erreichbarkeitspotenziale der vier Modi vor, die später zur Einordnung der Erreichbarkeitspotenziale automatisierter Angebotsformen genutzt werden.

4.2.6 Erreichbarkeitsmodell für automatisierte Angebotsformen

Das Projekt folgt nun der Idee, die für die Modi Fussverkehr, Veloverkehr, MIV und ÖV durchgeführte Erreichbarkeitsmodellierung auch für automatisierte Angebotsformen zu wiederholen und daraus die räumlich differenzierte Erreichbarkeitsveränderung abzuleiten (siehe Abb. 32).

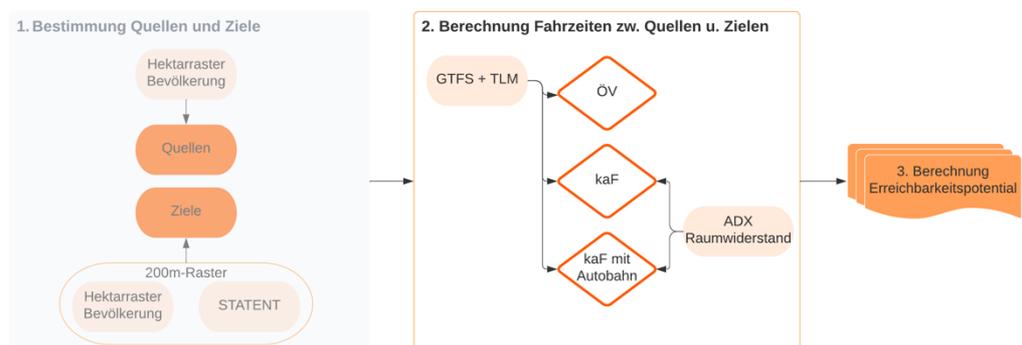


Abb. 32 Schematische Darstellung der Erreichbarkeitsmodellierung für automatisierte Angebotsformen

Die Bestimmung der Quell- und Zielpunkte erfolgt analog zum Kapitel 4.2.3. Dies führt dazu, dass für automatisierte Angebotsformen ein Tür zu Tür-Ansatz simuliert werden kann: Die Hektarrasterpunkte bilden dabei „Zustiegspunkte“ in das kaF-System im Abstand von 100 Metern (siehe Abb. 33). Auch auf der Zielseite gibt es im Abstand von 200 Metern

Ausstiegsmöglichkeiten (200 m Raster auf Basis der Hauptwohnsitze und der Arbeitsplätze). Die Zu- und Ausstiegspunkte der beiden regelmässigen Raster werden jeweils der nächstgelegenen, fussläufig begehbaren Kante des TLM zugeordnet.

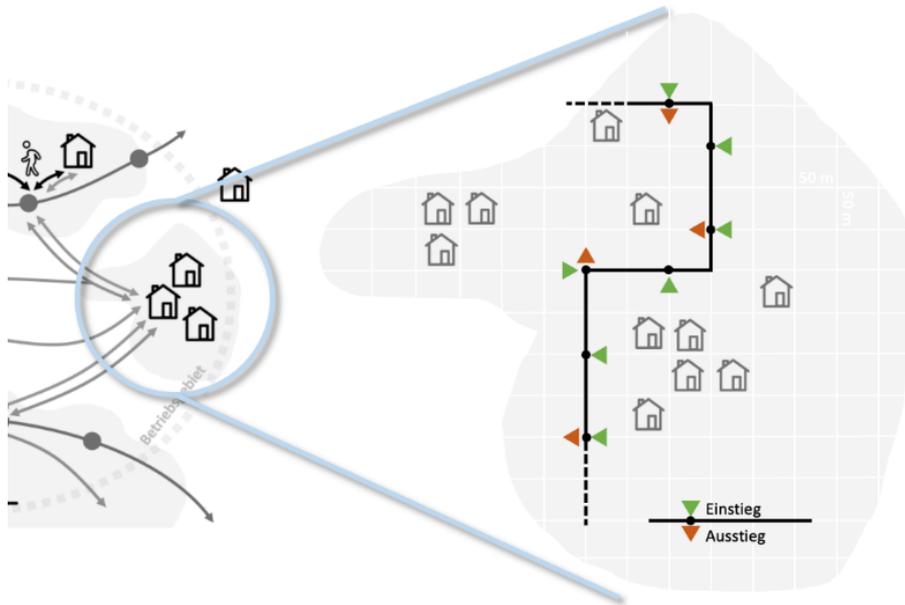


Abb. 33 Mit den verwendeten Quell- und Zielpunkten kann ein Tür zu Tür-Ansatz simuliert werden

Parallelverkehre: Substitution Buslinien

Der Funktionsumfang der GTFs-Netzwerkanalyse-Tools in der ArcGIS Pro Umgebung erlaubte, einzelne Linien, Modi oder Fahrten für die Berechnung der Reisezeiten zu exkludieren.

Tab. 17 Parameter der GTFs-Analyse in ArcGIS Pro

Parameter in ArcGIS Pro	Beschreibung
ÖV-Linien von der Analyse ausschließen (Exclude lines)	Dieser Parameter schliesst bestimmte ÖV-Linien von der Analyse aus, zum Beispiel, um eine vorübergehende Schliessung einer U-Bahn-Linie oder die Streichung einer Buslinie zu modellieren.
ÖV-Modi von der Analyse ausschließen (Exclude modes)	Dieser Parameter schliesst bestimmte Modi öffentlicher Verkehrsmittel von der Analyse aus, zum Beispiel, um vorübergehend den Verkehr auf allen U-Bahn-Linien zu unterbinden, um eine vollständige Schliessung des U-Bahn-Systems oder einen Streik der Arbeiter zu modellieren, aber alle Buslinien in Betrieb lassen.
ÖV-Fahrten von der Analyse ausschließen (Exclude runs)	Dieser Parameter schliesst konkrete Fahrten im ÖV-System von der Analyse aus, zum Beispiel, um die Streichung von Fahrten nach einer bestimmten Tageszeit zu modellieren oder um einige Fahrten auf einer Linie zu eliminieren, während andere Fahrten beibehalten werden.

Quelle: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/>

Um die theoretisch mögliche Parallelführung von automatisierten Angeboten und Buslinien (Siehe auch Limitationen – Kapitel 4.5) und des damit einhergehenden Risikos einer zusätzlichen Modi-Konkurrenz zu minimieren, wurden in einem zusätzlichen Durchlauf der Analyse sämtliche Buslinien exkludiert. Dazu wurde der Parameter „Exclude Modes“ verwendet.

Betrachtete automatisierte Angebotsformen

Für die weitere Bearbeitung wurden grundsätzlich zwei Angebotsformen des automatisierten Fahrens (aF) definiert: Die Angebotsform „kollektives aF auf der letzten Meile“ und die Angebotsform „kollektives aF auf der Autobahn“. Anhand dieser Angebotsformen werden zwei Varianten betrachtet:

- kaF auf der letzten Meile ohne Autobahn
- kaF auf der letzten Meile mit Autobahn

In beiden Varianten werden die Angebotsformen gemeinsam mit dem bestehenden ÖV-System betrachtet.

Integration aF-Befahrbarkeit als Raumwiderstand

Um die Erreichbarkeitsmodellierung der kaF-Angebotsformen zu ermöglichen und die in Kapitel 3 vorgestellten Ergebnisse zur räumlich-differenzierten Befahrbarkeit („Drivability“) für automatisierte Fahrzeuge in die Modellierung zu integrieren, wurde Ergebnis der aF-Befahrbarkeit in das Erreichbarkeitsmodell in ArcGIS Pro implementiert. Ziel ist die Umsetzung eines vereinfachten Modells, um später räumlich differenzierte Veränderungen des Erreichbarkeitspotenzials als Argumentationsbasis zu erhalten.

Die aF-Befahrbarkeit fungiert bei der Berechnung der Reisezeiten für automatisierte Angebotsformen als zusätzlicher Raumwiderstand, wobei Raumwiderstände im vorliegenden Erreichbarkeitsmodell (abseits der Fahrplandaten) wie bereits erwähnt über Geschwindigkeiten abgebildet werden. Um die aF-Befahrbarkeit also als Raumwiderstand zu integrieren, muss sie die Geschwindigkeit beeinflussen. Die Idee dahinter folgt der Überlegung, dass ein bessere aF-Befahrbarkeit in Form von höheren Geschwindigkeiten abgebildet wird, dadurch der Raumwiderstand geringer wird und das Potenzial am Ende erhöht. Umgekehrt führt eine schlechtere aF-Befahrbarkeit zu geringeren Geschwindigkeiten und damit höheren Raumwiderstand, was wiederum das Potenzial verringert (siehe Tab. 18).

Tab. 18 Schematisches Beispiel aF-Befahrbarkeit als Raumwiderstand

	Strassentyp	aF-Befahrbarkeit	modellierte Geschwindigkeit	Raumwiderstand	Potenzial
Beispiel 1		Gut	Hoch	Niedrig	wird grösser
Beispiel 2		Schlecht	Niedrig	Hoch	wird niedriger

Die Umsetzung dieser Überlegung erfolgte auf Basis des ÖV-Netzwerks, welches zusammen mit dem TLM bereits als Basis für die Berechnung des ÖV-Potenzials diente.

Während die ÖV-Modellierung des multimodalen und fahrplanfeinen Netzwerkgraphen gleichbleibt, erfolgten Änderungen bei auf dem TLM-basierenden Zu- und Abgangswegen. Um die Fortbewegung automatisierter Fahrzeuge zu simulieren, wurde die aF-Befahrbarkeit in konkrete Geschwindigkeitswerte übersetzt und diese einzelnen Strassenabschnitten des TLMs (Kanten) zugewiesen.

Im Zuge der Modellierung wurde eine Reihe an Limitationen thematisiert. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden diese vorerst ausgespart und später in Kapitel 4.5 gesammelt dargestellt.

4.2.7 Berechnung der Fahrzeiten für automatisierte Angebotsformen

Folgendes Kapitel gibt einen Überblick zur Berechnung der beiden Varianten „kollektives aF auf der letzten Meile ohne Autobahn“ sowie „... mit Autobahn“.

Einleitung Varianten

Variante „Kollektives aF auf der letzten Meile ohne Autobahn“

In der Variante „kollektives aF auf der letzten Meile“ ergänzen automatisierte Fahrzeuge das bestehende öffentliche Verkehrssystem, vor allem im Bereich der Zu- und Abgänge zu Stationen. Die Fusswege zur Station können nun mit automatisierten Fahrzeugen substituiert werden. Dies erschliesst neue räumliche Bereiche und verbessert die aktuelle Zugänglichkeit vor allem zum höherrangigen ÖV. Durch die ständige Verfügbarkeit der automatisierten Fahrzeuge sind auch dort Effekte zu erwarten, wo bisher nur ein geringes Fahrplanangebot mit niedriger Taktfolge vorhanden ist. Die automatisierten Fahrzeuge bewegen sich ausschliesslich im niederrangigen Strassennetz – Autobahnen sind in der Analyse mit einer Restriktion versehen und können nicht befahren werden.

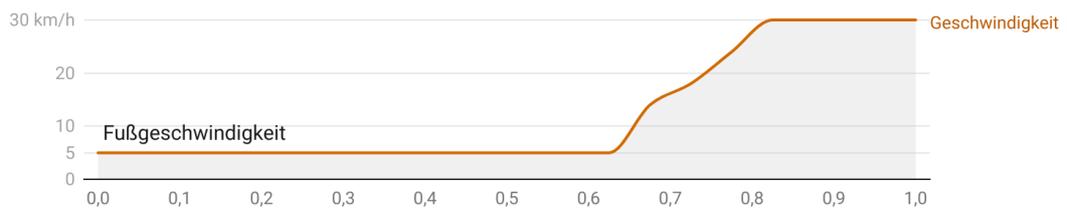
Tab. 19 Betriebsparameter der Angebotsform «kaF-letzte Meile»

Betriebsparameter	Annahme im Zuge der Angebotsform
Betriebsdauer bzw. Betriebszeiten	Entspricht ÖV-Bedienzeiten
Gefässgrösse	Nicht thematisiert
aF-Betriebsgebiet	gesamtes RZU-Gebiet mit Ausnahme der Autobahnen sowie Strassenabschnitten mit aF-Befahrbarkeit < 0,625
Umstiegswiderstand in kaF	Nicht berücksichtigt
Zu- und Abgangszeiten kaF	Tür zu Tür Betrieb auf Basis der räumlichen Auflösung der Quell- und Zielpunkte
Umstiegszeit ÖV-kaF	Gemäß GTFS-Daten beim ÖV berücksichtigt, keine Umstiegszeiten berücksichtigt für Umstieg automatisiertes Fahrzeug – ÖV
Wartezeiten automatisierte Fahrzeuge	Nicht berücksichtigt
Kosten	Nicht berücksichtigt

Zur Übersetzung der aF-Befahrbarkeit in konkrete Geschwindigkeitswerte wurden mehrere Sensitivitätsanalysen und Kalibrierungsvorgänge durchlaufen. Die Ergebnisse wurden anhand exemplarischer Beispiele auf Plausibilität überprüft. Die folgenden Werte wurden schlussendlich für die Bestimmung des Erreichbarkeitspotenzials verwendet:

Tab. 20 Raumwiderstände in der Angebotsform «kaF-letzte Meile»

aF-Befahrbarkeit	Raumwiderstand modellierte Geschwindigkeit	Interpretation	Auswirkung Erreichbarkeit
0 bis 0,625	5 km/h	Schrittgeschwindigkeit, kein aF-Einsatz	keine Veränderung zur ÖV-Erreichbarkeit
0,625 bis < 0,675	8 km/h	Einsatz von aF unter schwierigen Bedingungen mit sehr langsamer Geschwindigkeit	Minimale Erreichbarkeitsverbesserung
0,675 bis < 0,725	14 km/h	Einsatz von aF unter schwierigen bis moderaten Bedingungen mit moderater Geschwindigkeit	Geringe bis moderate Erreichbarkeitsverbesserung
0,725 bis < 0,775	18 km/h	Einsatz von aF unter mittelmässigen Bedingungen mit moderater Geschwindigkeit	Mittelmässige Erreichbarkeitsverbesserung
0,775 bis < 0,825	24 km/h	Einsatz von aF unter guten Bedingungen mit vergleichsweise hoher Geschwindigkeit	Mittel bis hohe Erreichbarkeitsverbesserung
0,825 bis < 1	30 km/h	Sehr gute Bedingungen, Ausfahren der aF-Höchstgeschwindigkeit	Hohe Erreichbarkeitsverbesserung



Erstellt mit Datawrapper

Abb. 34 aF-Befahrbarkeit-abhängige Geschwindigkeit der Angebotsform "kaF-letzte Meile"

Die Geschwindigkeitswerte dienen als Raumwiderstand. Es handelt sich dabei um angenommene Werte, welche zwar bestmöglich kalibriert und validiert wurden, am Ende aber ein Mittel zum Zweck bleiben. Ziel ist es, räumlich differenzierte Veränderungspotenziale zu identifizieren, indem ein Vergleich zwischen automatisierten Angebotsformen und dem bestehenden ÖV-Netz stattfindet.

Bei der Wahl der Geschwindigkeiten wurde weiterhin berücksichtigt, dass auch automatisierte Angebotsformen in Konkurrenz zu anderen Modi stehen, allen voran der aktiven Mobilität. Durch die Festlegung der Geschwindigkeit (und damit des Raumwiderstands) von 5 km/h bei Kanten mit schlechter aF-Befahrbarkeit wurde simuliert, dass hier keine Erreichbarkeitsverbesserung stattfinden wird.

Variante „Kollektives aF auf der letzten Meile mit Autobahn“

In der Variante „kollektives aF auf der letzten Meile mit Autobahn“ ergänzen automatisierte Fahrzeuge ebenso das bestehende öffentliche Verkehrssystem, vor allem im Bereich der Zu- und Abgänge zu Stationen. Die Fusswege zur Station können nun mit automatisierten Fahrzeugen substituiert werden. Die automatisierten Fahrzeuge bewegen sich dabei aber nicht nur ausschliesslich im niederrangigen Strassennetz – die Restriktion auf Autobahnen wurde entfernt und die Nutzung ist möglich. Dies erschliesst neue räumliche Bereiche und verbessert die aktuelle Zugänglichkeit vor allem zum höherrangigen Verkehr. Durch die ständige Verfügbarkeit der automatisierten Fahrzeuge sind auch dort Effekte zu erwarten, wo bisher nur ein dünnes Fahrplanangebot mit niedriger Taktfolge vorhanden ist. Darüber hinaus kann durch die Nutzung der Autobahnen ein neues (über-)regionales Angebot

geschaffen werden, welches den ÖV nicht nur als Zubringersystem ergänzt, sondern neue Relationen als Erweiterung des bestehenden ÖV-Netzes erschliesst.

Tab. 21 Betriebsparameter der Angebotsformen «kaF-letzte Meile» und «kaF-Autobahn»

Betriebsparameter	Annahme im Zuge der Angebotsform
Betriebsdauer bzw. Betriebszeiten	Entspricht ÖV-Bedienzeiten
Gefässgrösse	Nicht thematisiert
aF-Betriebsgebiet	gesamtes RZU-Gebiet inkl. der Autobahnen, mit Ausnahme von Strassenabschnitten mit aF-Befahrbarkeit < 0,625
Umstiegswiderstand in kaF	Nicht berücksichtigt
Zu- und Abgangszeiten kaF	Tür zu Tür Betrieb auf Basis der räumlichen Auflösung der Quell- und Zielpunkte
Umstiegszeit ÖV-kaF	Gemäß GTFS-Daten beim ÖV berücksichtigt, keine Umstiegszeiten berücksichtigt für Umstieg automatisiertes Fahrzeug – ÖV
Wartezeiten automatisierte Fahrzeuge	Nicht berücksichtigt

Zur Übersetzung der aF-Befahrbarkeit in konkrete Geschwindigkeitswerte wurden wiederum mehrere Sensitivitätsanalysen und Kalibrierungsvorgänge durchlaufen. Die Ergebnisse wurden anhand exemplarischer Beispiele auf Plausibilität überprüft.

Tab. 22 Raumwiderstände in der Angebotsform «kaF-Autobahn»

aF-Befahrbarkeit	Raumwiderstand Modellierte Geschwindigkeit	Interpretation	Auswirkung Erreichbarkeit
0 bis 0,625	5 km/h	Schrittgeschwindigkeit, kein aF-Einsatz	keine Veränderung zur ÖV-Erreichbarkeit
0,625 bis < 0,675	8 km/h	Einsatz von aF unter schwierigen Bedingungen mit sehr langsamer Geschwindigkeit	Minimale Erreichbarkeitsverbesserung
0,675 bis < 0,725	14 km/h	Einsatz von aF unter schwierigen bis moderaten Bedingungen mit moderater Geschwindigkeit	Geringe bis moderate Erreichbarkeitsverbesserung
0,725 bis < 0,775	18 km/h	Einsatz von aF unter mittelmässigen Bedingungen mit moderater Geschwindigkeit	Mittelmässige Erreichbarkeitsverbesserung
0,775 bis < 0,825	24 km/h	Einsatz von aF unter guten Bedingungen mit vergleichsweise hoher Geschwindigkeit	Mittel bis hohe Erreichbarkeitsverbesserung
0,825 bis < 1	30 km/h	Sehr gute Bedingungen, Ausfahren der aF-Höchstgeschwindigkeit	Hohe Erreichbarkeitsverbesserung
0,825 bis < 1 UND Strassentyp Autobahn	70 km/h	Perfekte Bedingungen in einem abgeschlossenen Infrastruktursystem erlauben sehr hohe Geschwindigkeiten	Sehr hohe Erreichbarkeitsverbesserung

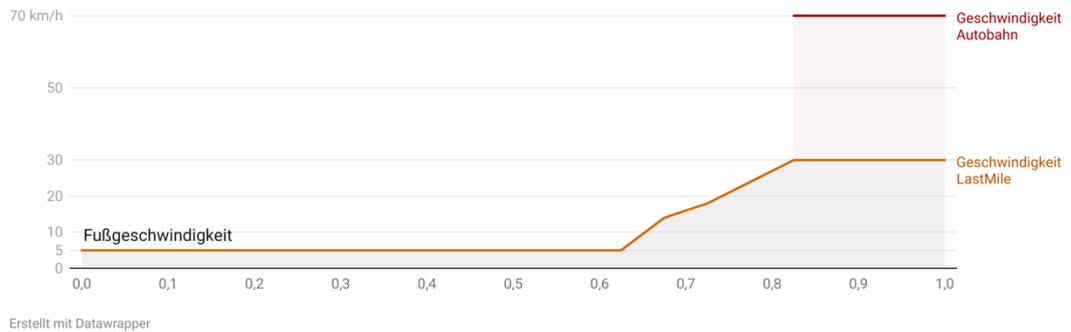


Abb. 35 aF-Befahrbarkeit-abhängige Geschwindigkeit Angebotsform «kaF-Autobahn»

Bei Strassenkanten vom Typ „Autobahn“ wird keine weitere Unterscheidung nach aF-Befahrbarkeit mehr vorgenommen, sondern die Geschwindigkeit (=Raumwiderstand) von 70 km/h generell angewandt.

4.2.8 Ermittlung Erreichbarkeitspotenzial und Erreichbarkeitsveränderung

Die Berechnung des Potenzials (siehe Formel 5) erfolgte analog der Vorgehensweise der anderen Modi, wobei als Wert für den Koeffizienten der Exponentialfunktion die gleiche Zahl wie beim ÖV angenommen wurde. Mit dieser Vorgehensweise lässt sich die Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials je Quellpunkt gut vergleichen, wobei der Fokus hier weniger auf absoluten Zahlen, sondern auf relativen Unterschieden liegt.

Die Veränderung im Erreichbarkeitspotenzial wird im weiteren Verlauf als aF-Delta bezeichnet, wobei zwischen dem aF-Delta ohne Autobahn und dem aF-Delta mit Nutzung der Autobahn (aF-Delta-Autobahn) unterschieden wird. Dieses Delta wird durch die Differenz zwischen dem Potenzial-Ergebnisdatensatz des ÖV und dem jeweiligen aF-Layer definiert.

Formel 5: Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials

$$\delta_{aF} = P_{aF} - P_{\text{ÖV}}$$

$$\delta_{aF\text{-Autobahn}} = P_{aF\text{-Autobahn}} - P_{\text{ÖV}}$$

wobei:

δ_{aF} = Erreichbarkeitsveränderung

$P_{\text{ÖV}}$ = Erreichbarkeitspotenzial ÖV

$P_{aF\text{Modi}}$ = Erreichbarkeitspotenzial aF Modi

Die Identifizierung von räumlichen Gebieten mit hohem oder niedrigem Delta der Erschliessungsqualität erlaubt Aussagen über Veränderung der Eigenschaften durch die neuen aF-Modi und damit eine quantitative Annäherung der Betrachtung der räumlichen Auswirkungen des autonomen Fahrens.

4.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Erreichbarkeitsmodellierung mit dem Fokus auf die kaF-Angebotsformen vorgestellt. Die Darstellung erfolgt vorrangig über Karten und Visualisierungen. Es wird gezeigt, wie die Karten zu lesen sind und es wird auf notwendige Limitationen hingewiesen. Um dieses Kapitel trotzdem kompakt zu halten, wurde eine Auswahl der gezeigten Karten vorgenommen, die restlichen Abbildungen finden sich im Anhang II (als separate Datei verfügbar auf <https://www.mobilityplatform.ch/>).

Die Betrachtung der Ergebnisse erfolgt unterschieden nach den Ebenen Makro, Meso und Mikro.

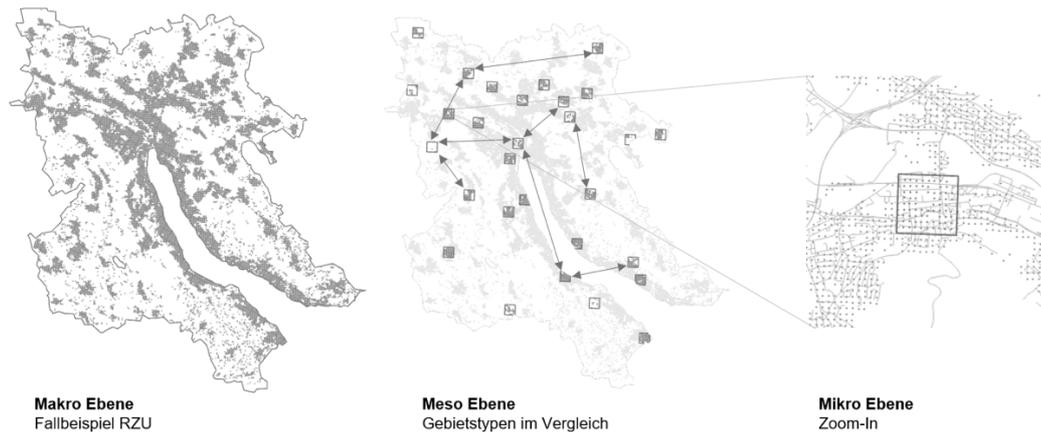


Abb. 36 *Verwendete Analyseebenen*

4.3.1 Makro-Ebene: Veränderung Erreichbarkeitspotenzial Fallbeispiel RZU

Die Karten zur Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials (Delta) visualisieren je Quellpunkt (Hektarraster) die Differenz zwischen dem ÖV-Potenzial und dem ÖV-Potenzial mit aF (bzw. aF-Autobahn) Potenzial (vgl. Abb. 37/Abb. 38). Darüber hinaus sind die eingangs erwähnten Gebietstypen dargestellt. Ein hoher Deltawert bedeutet eine hohe Verbesserung des Erreichbarkeitspotenzials, ein niedriger Deltawert demzufolge eine geringe (bzw. kaum vorhandene, keine) Verbesserung des Erreichbarkeitspotenzials.

Die kartographische Darstellung erfolgt dabei auf Basis unterschiedlicher Klassifizierung. Die Potenzialwerte für die kaF-Angebotsform haben eine geringere Spannweite als jene bei Benutzung der Autobahn. Dies begründet sich daher, dass durch die Nutzung der Autobahn Raumwiderstände sinken und eine grössere Anzahl an Hauptwohnsitzen und Arbeitsplätzen in kürzerer Zeit erreicht werden kann. Dieser Effekt ist auch in den oben gezeigten Diagrammen ablesbar. Um die relativen Unterschiede in der Klassifizierung zu bewahren, wurde die Entscheidung getroffen, unterschiedliche Klassifizierungen zu nutzen. Dies hat den Vorteil, dass die Karten in sich ein stimmiges und valides Bild kommunizieren, aber die Vergleichbarkeit nur eingeschränkt möglich ist. Eingeschränkt meint dabei, dass die generelle bzw. gesamt-räumliche Aussage der Karten durchaus im Rahmen von Diskussionen auch hinsichtlich Unterschieden benutzt werden kann, jedoch z.B. die Werte einzelner Quellpunkte nicht sinnvoll miteinander verglichen werden sollten.

Im Blick auf das RZU-Gebiet lässt sich erkennen, dass die Innenstadt Zürichs in grossen Teilen die geringste Verbesserung der Erschliessungsqualität aufweist. Vergleicht man die Darstellung mit der Visualisierung der aF-Befahrbarkeit (siehe Abb. 22), so wird der Grund klar: Aufgrund des urbanen Charakters ist die Eignung des Strassennetzes vor allem in der Innenstadt Zürichs nur bedingt gegeben. Darüber hinaus ist die Innenstadt mit einem sehr dichten und attraktiven ÖV-Angebot versorgt. Diese zwei Gründe führen dazu, dass hier kaum eine Veränderung der Erschliessungsqualität durch kaF zu erwarten ist.

Folgt man der Bahnlinie am westlichen (linken) Ufer des Zürichsee und betrachtet dort vor allem das Bahnhofsumfeld, so zeigt sich deutlich, dass im direkten Umfeld der Bahnhöfe vergleichsweise ebenso eine geringe Veränderung der Erreichbarkeit zu erwarten ist. Anders sieht das aber im erweiterten Bahnhofsumfeld aus: Dort, wo bisher nur schlechte ÖV-Zubringer vorhanden sind und die Distanzen zum Bahnhof entsprechend gross werden sowie gleichzeitig eine entsprechende aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes gegeben ist, können automatisierte Shuttles zur Verbesserung der Erreichbarkeit beitragen. Dies sind meist periphere Lagen des jeweiligen Siedlungskörpers mit relativ geringer Nutzungsdichte und grosszügigen Strassenräumen.

Vergleicht man nun die Ergebnisse der Analyse ohne Autobahn mit jener, bei der die Autobahn für automatisierte Fahrzeuge zur Nutzung freigegeben ist, zeigt sich, dass vor allem im Umfeld der Autobahnauffahrten hohe Veränderungen des

Erreichbarkeitspotenzials entstehen. Es entstehen neue tangentielle Verkehrsrelationen, die dazu führen, dass die untersuchten Gebiete nahe den Autobahnen stark profitieren. Die Innenstadt Zürichs sowie die Räume entlang der Bahnlinien zeigen im Vergleich mit/ohne Autobahn hingegen kaum Veränderungen – hier ist die Veränderung der Erreichbarkeitsqualität in beiden Varianten in etwa gleich. Das östliche (rechte) Seeufer profitiert jedoch im Vergleich weniger.

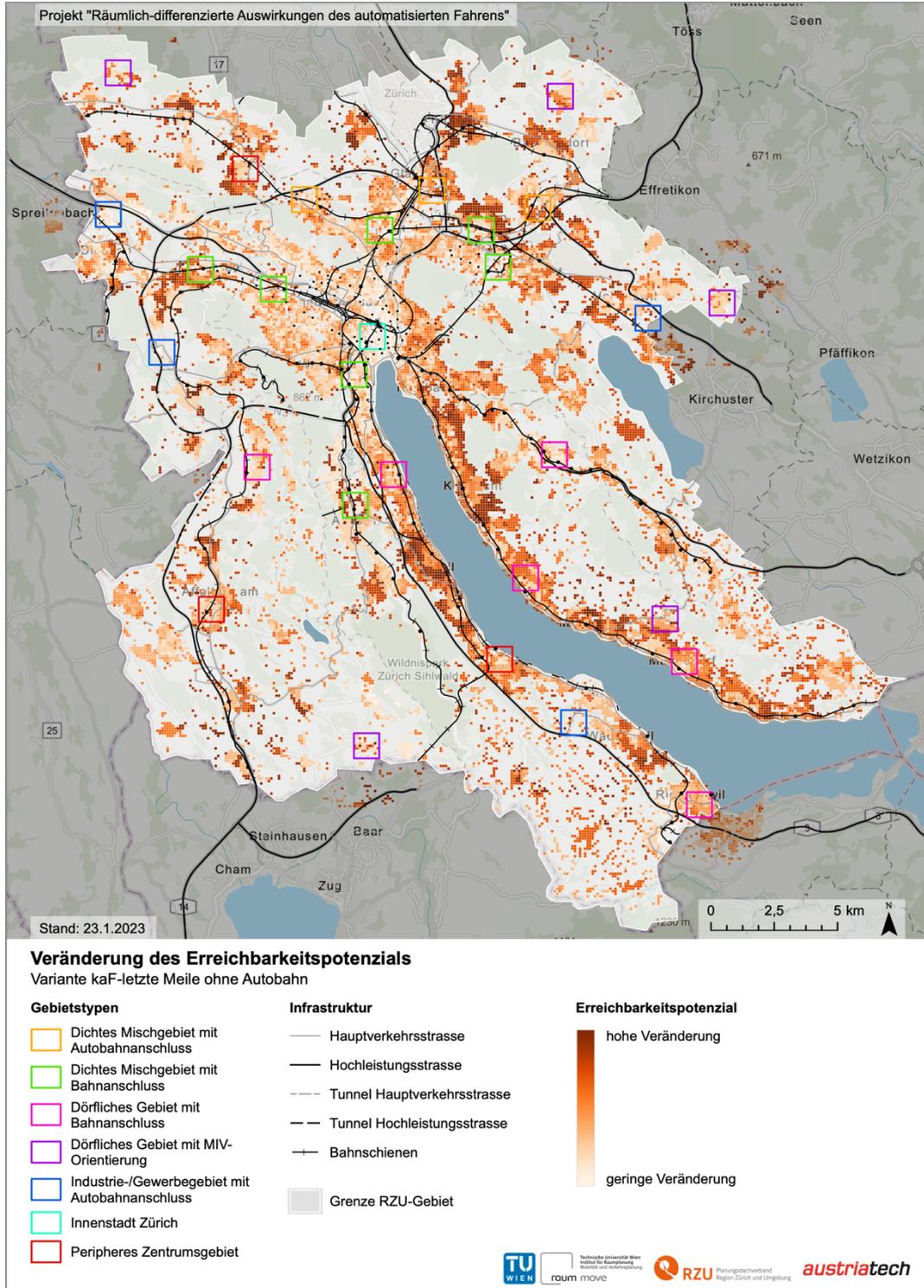


Abb. 37 Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials, Variante «kaF-letzte Meile ohne Autobahn»

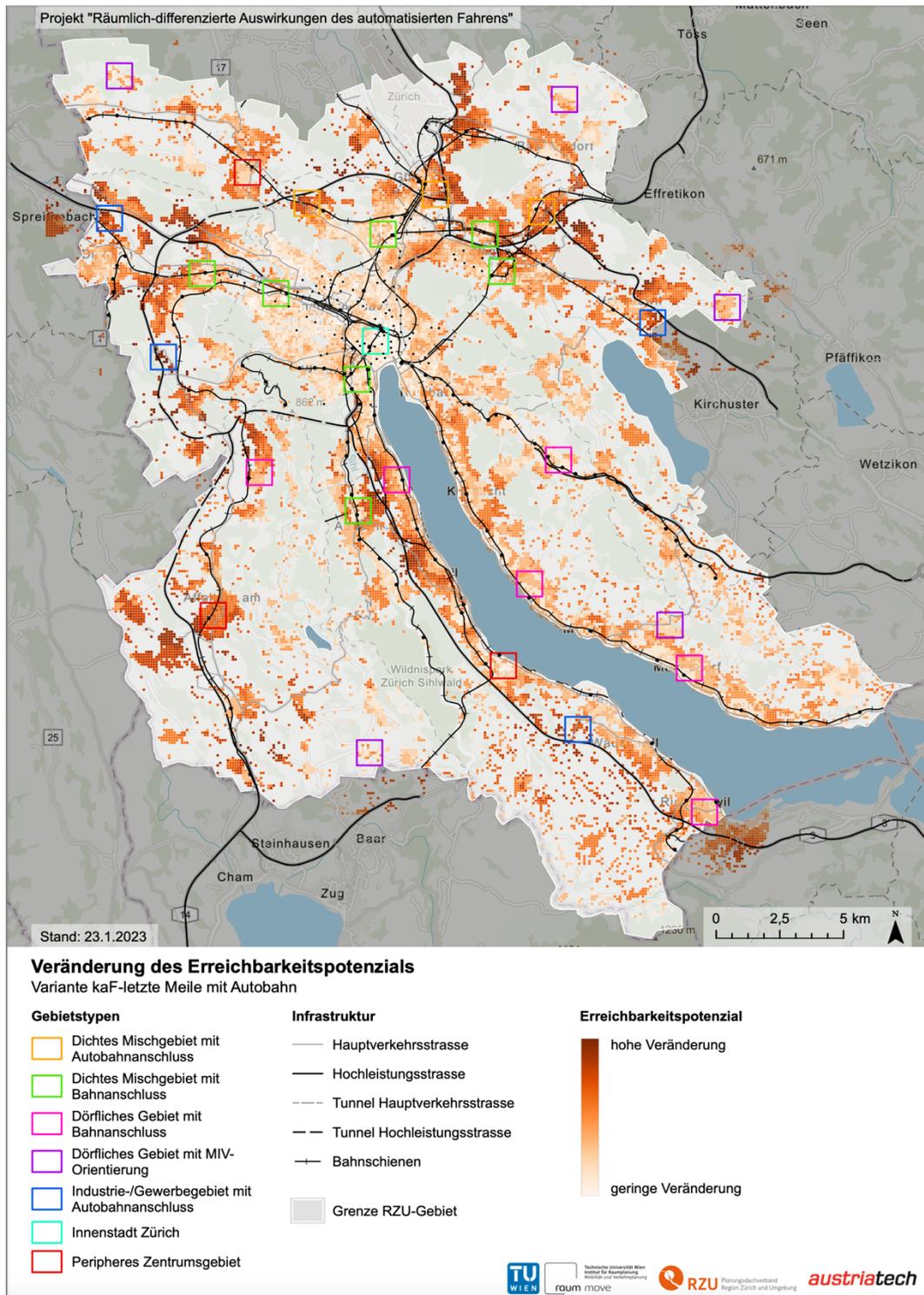


Abb. 38 Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials, Variante «kaF-letzte Meile mit Autobahn»

Bivariate Karten: Räumliche Kontextualisierung

Die Verwendung des Hektarrasters als Quellpunktdatensatz für die Erreichbarkeitsmodellierung erlaubt eine kleinräumige Verschneidung mit weiteren raumbezogenen Datensätzen und so eine Anreicherung der Ergebnisse und damit tiefergehende Interpretation anhand einer Kontextualisierung.

Um hier eine erste Annäherung zu treffen, wurde von der Berechnung komplexer räumlicher Indikatoren abgesehen. Stattdessen wurde ein einfacher Ansatz aus der Kartographie verwendet: Bivariate Symbolisierung auf Basis einer thematischen Karte.

Die bivariate Farbsymbolik zeigt die quantitative Beziehung zwischen zwei Variablen in einer Merkmalsebene. Dazu wird jedes darzustellende Merkmal jeder Variable klassifiziert und somit einer Kategorie und Farbe zugeordnet. Im folgenden Beispiel ist das bivariate Farbschema das Produkt aus zwei Variablen mit jeweils drei diskreten Klassen. Dadurch entsteht ein quadratisches Raster mit neun eindeutigen Farben. Mithilfe dieser Darstellung können beispielsweise Gebiete identifiziert werden, in denen beide Variablen hoch oder niedrig sind. (vgl. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/bivariate-colors.htm>)

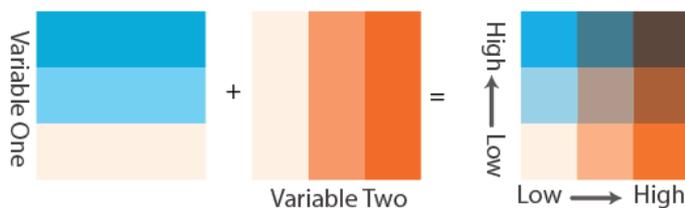


Abb. 39 Funktionsweise bivariate Symbolisierung (Quelle: pro.arcgis.com/en/latest/help/)

Durch die jeweils Variablen-spezifische Klassifizierung sind Vergleiche zwischen verschiedenen bivariaten Karten mit verschiedenen Merkmalen nur begrenzt möglich und sinnvoll durchführbar. Dies ist bei der Betrachtung sämtlicher bivariater Choroplethenkarten in diesem Bericht zu berücksichtigen.

Als räumliche Darstellungsbasis für bivariate Karten wurde im Rahmen des Projekts ein Hexagon-Raster verwendet, das aus einzelnen regelmässigen Sechsecken mit einer Kantenlänge von 340 Metern besteht. Innerhalb dieser Sechsecke wurden die jeweiligen Statistiken berechnet – z.B. Summe der Bevölkerung oder durchschnittlicher aF-Befahrbarkeit. Die einzelnen Werte der Hexagone wurden anschliessend über eine bivariate Symbolisierung visualisiert, wobei die Klassifizierung durch Quantile mit drei Klassen erfolgte. Dies bedeutet, dass je Variable das unterste, mittlere und höchste Drittel in einer eigenen Kategorie dargestellt wird. Dieser Umstand hat zur Folge, dass die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen bivariaten Karten nur bedingt gegeben ist. Die Potenzialwerte des aF-Autobahn-Ergebnisses haben beispielsweise eine andere Bandbreite als die des aF-Ergebnisses, weshalb auch die Klassifizierung unterschiedlich ist, obwohl die Einteilung jeweils in unterstes, mittleres und höchstes Drittel erfolgt.

Verschneidung Erreichbarkeitsveränderung und aF-Befahrbarkeitsindex

Nachfolgende bivariate Karte vergleicht räumlich die Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials und des aF-Befahrbarkeitsindex, wobei bei letzterem innerhalb jeder Hexagon-Zelle der Mittelwert gebildet wurde. Obwohl die aF-Befahrbarkeit bereits als Raumwiderstand im Zuge der Berechnung des Erreichbarkeitspotenzials berücksichtigt wurde und damit auch in der visualisierten Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials enthalten ist, ist es mit der Karte möglich, weitere Schlüsse zu ziehen. So sind jene Gebiete sichtbar, in denen zwar eine gute aF-Befahrbarkeit gegeben ist aber keine hohe Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials erreicht wird. Umgekehrt können auch Gebiete schlechter aF-Befahrbarkeit und gleichzeitig trotzdem grosser Verbesserung des Erreichbarkeitspotenzials identifiziert werden.

Verschneidung Veränderung mit Bevölkerungsdichte

Die Berechnung der Erreichbarkeit berücksichtigt zwar räumliche Attraktivitäten über die Einbindung Anzahl der Bevölkerung und der Arbeitsplätze – aber lediglich am Zielort. Für weitere Analyseschritte ist neben der Lokalisierung der Erreichbarkeitsverbesserung auch wichtig, wie stark bewohnt die jeweiligen Gebiete sind.

In der Karte ist zu sehen, dass die Innenstadt Zürichs zwar eine grosse Zahl an Bevölkerung beherbergt, gleichzeitig aber auch die Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials gering ist. Gebiete mit sowohl vergleichsweise hohen Bevölkerungszahlen und hohem Erreichbarkeitsdelta finden sich entlang der Ufer des Zürichsees, im Norden Zürichs sowie im westlichen Limmattal. Bei der Betrachtung der Angebotsform kaF-Autobahn können auch Areale rund um Autobahnabfahrten im Westen des Untersuchungsgebiets identifiziert werden, bei denen eine Verbesserung der Erreichbarkeit mit hohen Bevölkerungszahlen zusammentrifft.

Grosse Gebiete mit zwar hoher Verbesserung des Erreichbarkeitspotenzials, aber vergleichsweise geringen Bevölkerungszahlen finden sich vor allem im Süden des Untersuchungsgebiets, abseits der Schieneninfrastrukturen sowie östlich des Zürichsees ebenfalls abseits der Gebiete mit hochrangiger ÖV-Erschliessung.

Weitere bivariate Karten mit beiden Varianten kaF-letzte Meile ohne und mit Autobahn sowie Verbesserung der Erreichbarkeit und Beschäftigte finden sich im Anhang II.2.

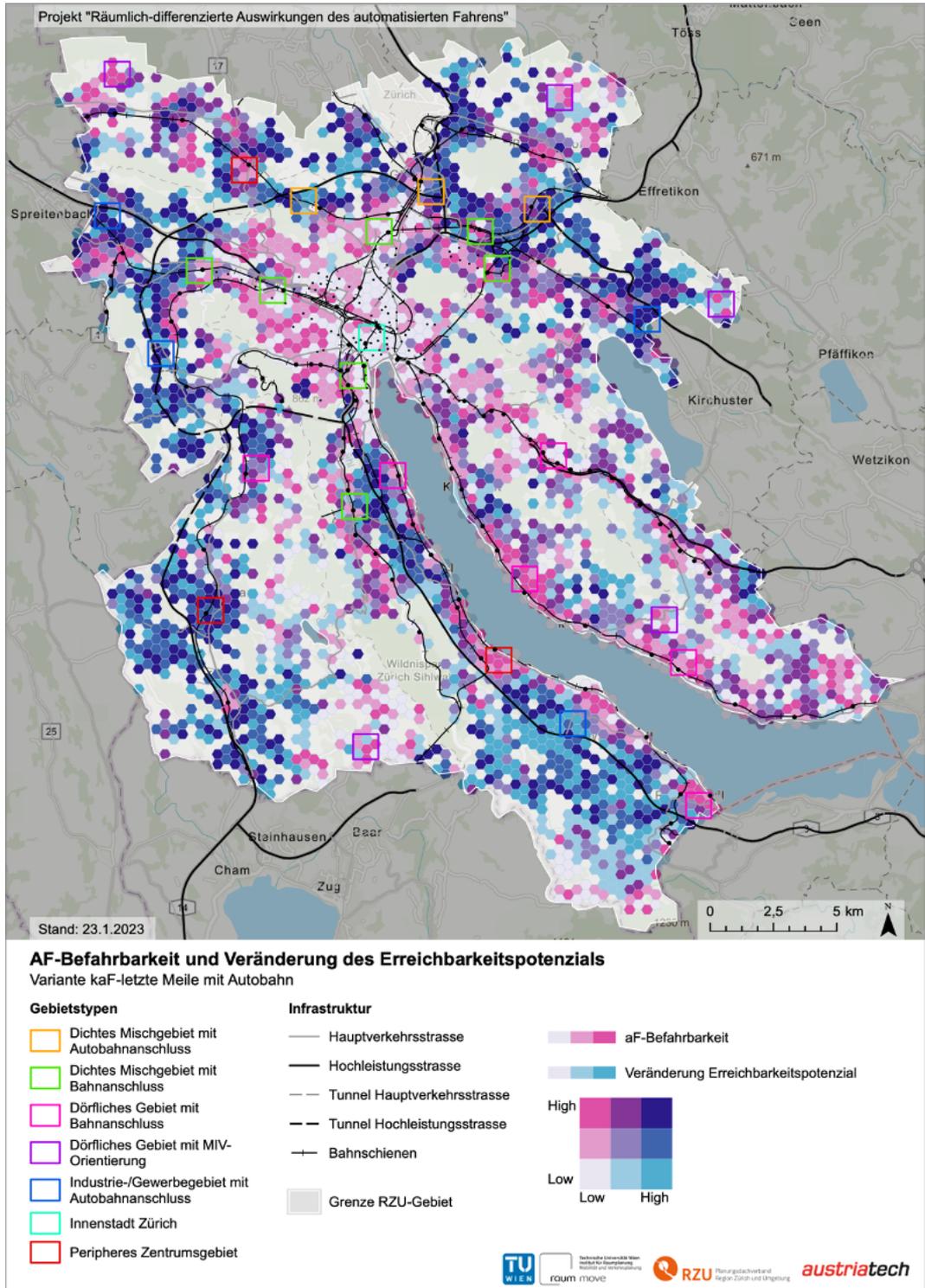


Abb. 40 bivariate Karte Veränderung Erreichbarkeitspotenzial und aF-Befahrbarkeit, Varianten «kaF-letzte Meile mit Autobahn»

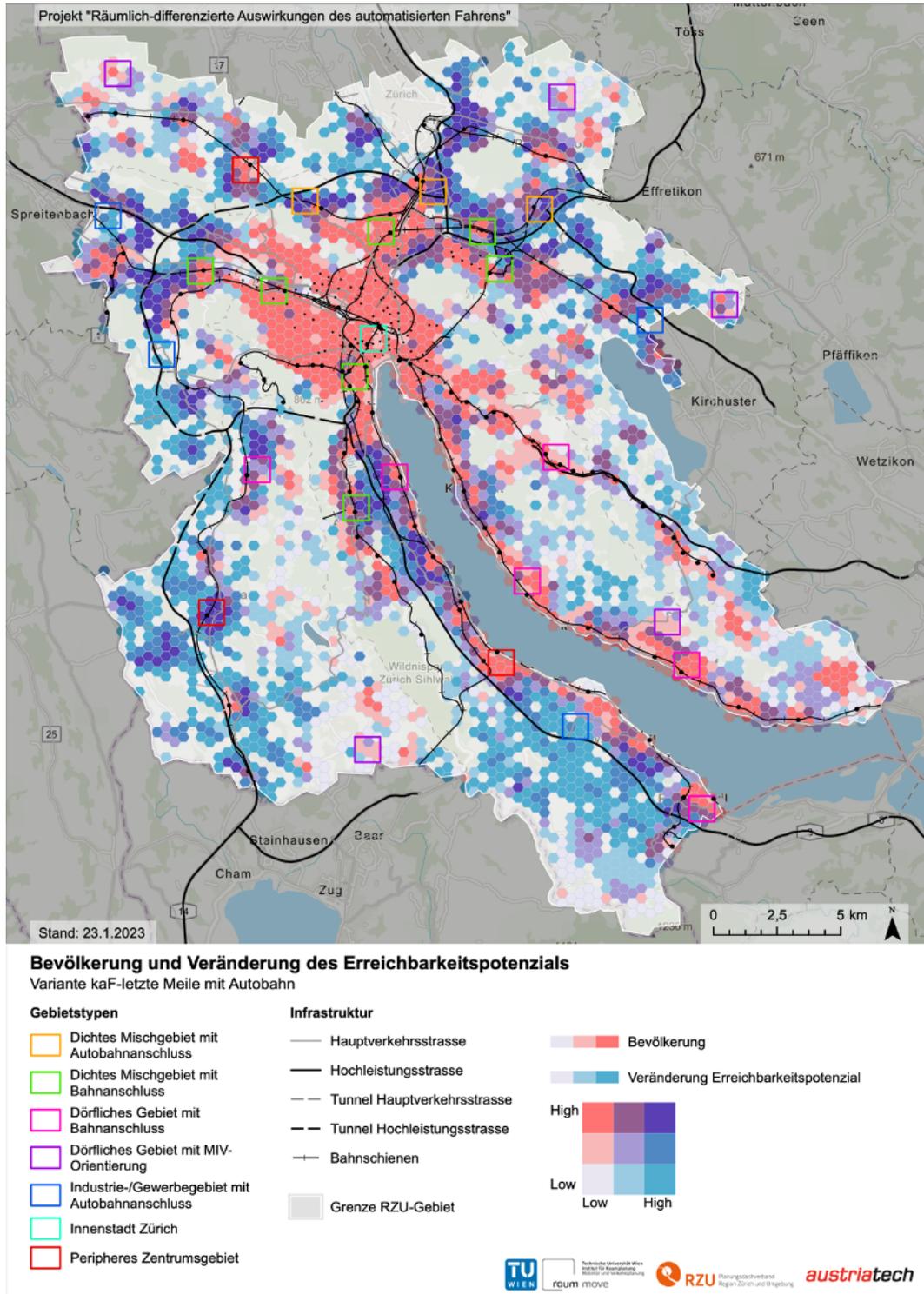
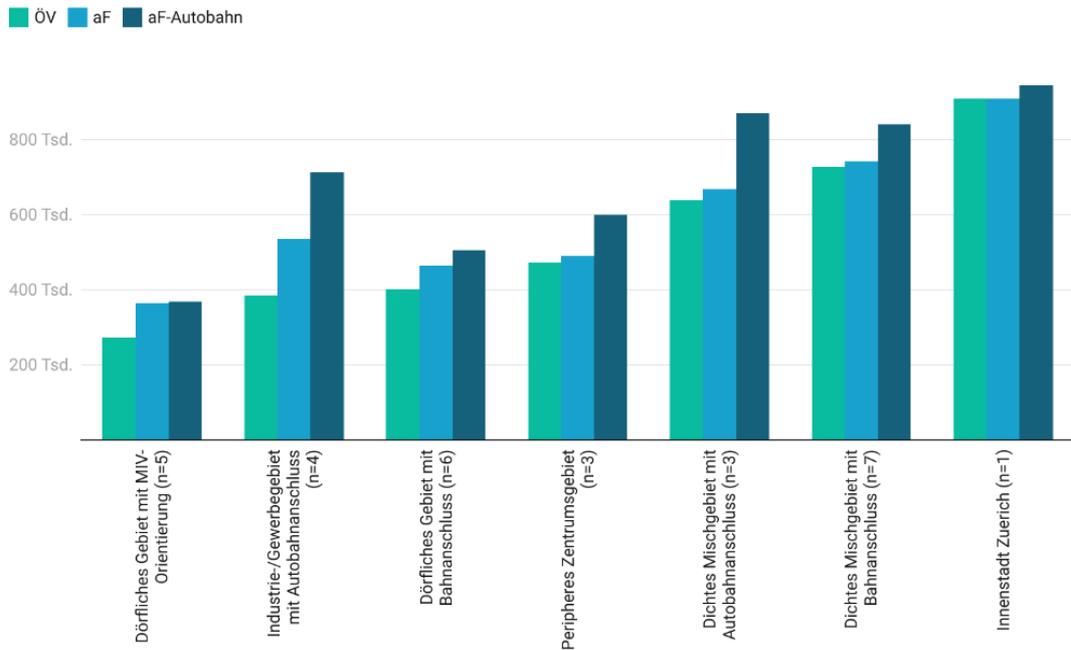


Abb. 41 Bivariate Darstellung Bevölkerung und Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials, Variante «kaF-letzte Meile mit Autobahn»

4.3.2 Meso-Ebene: Erreichbarkeitspotenzial nach Gebietstypen

Die berechneten Erreichbarkeitspotenziale wurden zunächst auf der Meso-Ebene nach Gebietstyp ausgewertet. Die Abb. 42 zeigt, dass die Höhe des Erreichbarkeitspotenzials allgemein in der Innenstadt Zürichs am höchsten liegt. Gleichzeitig ist dort auch die Veränderung des Potenzials durch die beiden automatisierten Angebotsformen vergleichsweise gering. Grösste Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials entsteht vor allem durch die Angebotsform kaF-Autobahn, besonders in jenen Gebietstypen, wo ein Autobahnanschluss besteht. Auch die Innenstadt Zürich profitiert von dieser Angebotsform, da hier im Modellansatz ein zusätzliches Angebot mit zusätzlichen Verbindungen in die Region geschaffen wird. In dichteren Gebieten ist die Veränderung durch kaF-Modi vergleichsweise geringerer als in dörflicheren Gebietstypen.



Basis: Mittelwert der Erreichbarkeitspotenziale je Beispiel und Gebietstyp
Erstellt mit Datawrapper

Abb. 42 Erreichbarkeitspotenzial nach Gebietstyp und Variante (ÖV, aF, aF-Autobahn)

Im Vergleich des Erreichbarkeitspotenzials nach Gebietstypen und Angebotsform inkl. der Modi Fussverkehr, Veloverkehr und motorisierter Individualverkehr (siehe Abb. 43) zeigt sich, dass mit der Angebotsform kaF-Autobahn das Potenzial nahezu jenes Niveau des MIV erreicht. Hier ist aber zu beachten, dass der MIV mitunter das höchste Erreichbarkeitspotenzial aufweist. Es ist davon auszugehen, dass durch die nicht vorliegenden Kantenbelastungen (Verkehrsaufkommen, Stau, Verzögerungen, ...) sowie nicht implementierte Zu- und Abgangszeiten (z.B. durch Parksuchverkehr, Zugang zum geparkten Pkw, ...) das Potenzial überschätzt wird – siehe auch Limitationen. Die folgende Grafik kann daher nur als grobe Abschätzung dienen – lässt jedoch keine detaillierten, belastbaren Aussagen zu.

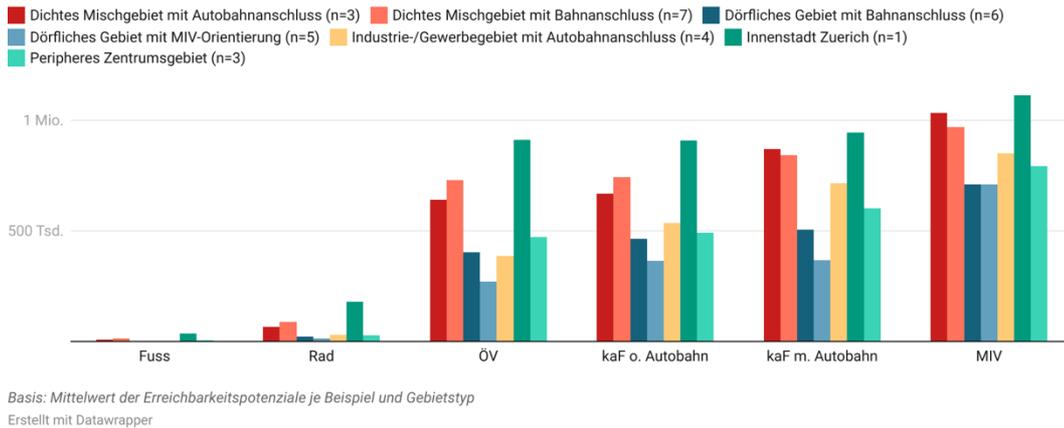


Abb. 43 Erreichbarkeitspotenzial nach Gebietstyp und Variante

Das Erreichbarkeitspotenzial erhöht sich in den dörflichen Gebieten bereits bei der Angebotsform kaF-letzte Meile, was daraufhin deutet, dass es Verbesserungspotenzial hinsichtlich des ÖV gibt. Darüber hinaus entsteht dieser Effekt bei den anderen Gebietstypen erst durch kaF mit Autobahn. Die Schlussfolgerung liegt nahe, dass dieser Umstand durch die schon heute bestehende gute Qualität des ÖV entsteht.

Die Konkurrenzierung mit Fuss und Velo zeigt sich insbesondere in den weniger dichten Gebieten, wo der Anteil im Vergleich sowieso gering ist. In den dichten Mischgebieten muss man um das Niveau von Fuss und Velo zu halten, das Angebot gut gestalten und gleichzeitig auch an der Attraktivität von Fuss und Velo arbeiten.

4.3.3 Mikro-Ebene: Zoom-In Schlieren-Urdorf

Das Erreichbarkeitsdelta kann nicht nur im Massstab der Gesamtregion spannende Ausgangspunkte für weitere Diskussionen bieten – auch kleinräumige Einblicke sind möglich. Am Beispiel Schlieren werden bereits zuvor erwähnte Aspekte nochmals deutlich (siehe Abb. 44): Das Gebiet um den Bahnhof mit bereits bestehendem attraktivem ÖV-Angebot verzeichnet eine vergleichsweise geringe Veränderung im Erreichbarkeitspotenzial. Eine hohe Verbesserung des Erreichbarkeitspotenzials verzeichnen vor allem jene Flächen im Nordwesten des Gebietstyps, wo heute vorrangig Gewerbeflächen vorzufinden sind und durch die Raumstruktur eine tendenziell gute aF-Befahrbarkeit gegeben ist.

Zu sehen ist auch, dass im direkten Umfeld des Bahnhofs und damit in fussläufigen Distanzen eine vergleichsweise geringe Erreichbarkeitsveränderung auftritt. Grössere Erreichbarkeitsveränderungen sind ringförmig rund um den Bahnhof und andere höherrangige Stationen feststellbar, vor allem bei typischen Velodistanzen.

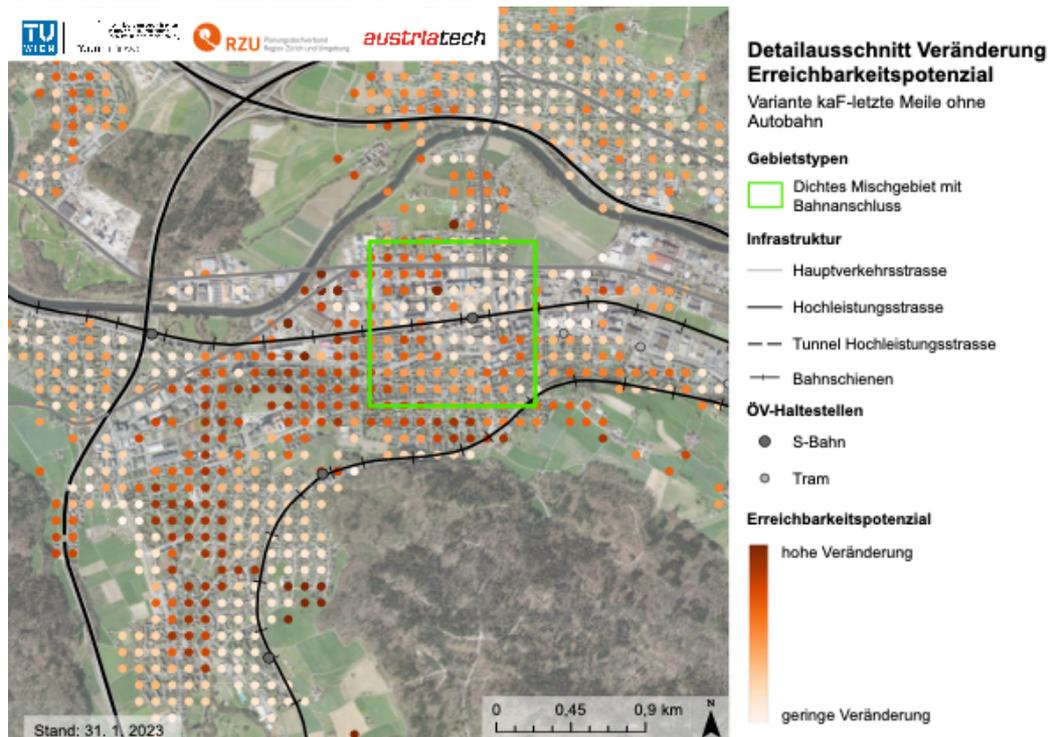


Abb. 44 Detailausschnitt Veränderung Erreichbarkeitspotenzial Variante «kaF-letzte Meile ohne Autobahn» Schlieren-Urdorf

Die Variante inkl. Nutzung der Autobahnen bringt im Gebietstyp selbst keine abweichenden Erkenntnisse. Eine stärkere Verbesserung des Erreichbarkeitspotenzial ist hier wiederum bei jenen Flächen zu beobachten, die westlich näher am Autobahnzubringer liegen. Hier entstehen durch diese Angebotsform neue attraktive (hochrangige) Anbindungsmöglichkeiten.

Zusammengefasst findet man im Grenzgebiet Schlieren-Urdorf eine interessante Schnittmenge vor: Es besteht über die Tauglichkeit eine technologische Machbarkeit für automatisiertes Fahren, es könnten relativ viele Einwohner:innen von der Verbesserung des Erreichbarkeitspotenzial profitieren und unterschiedliche Mobilitätsbedürfnisse könnten adressiert werden. Einschränkend ist hier zu berücksichtigen, dass für die Erreichbarkeitsberechnung der neue Fahrplan nach Inbetriebnahme der Limmattalbahn in diesem Raum nicht berücksichtigt werden konnte und sich hierdurch die Ergebnisse verändern können.

Exkurs: Plausibilitätscheck mit der Variante ohne Bus-Linien

Die Beurteilung der Plausibilität der Ergebnisse auf allen drei Ebenen erfolgte durch das lokale Wissen der Mitarbeiter:innen der Geschäftsstelle der RZU sowie im Rahmen eines Stakeholderworkshops.

Für die interne Beurteilung der Plausibilität wurden auch die Ergebnisse der Berechnung ohne die Busverbindungen herangezogen. Die Veränderung zwischen der Variante mit und ohne Bus für die Erreichbarkeitsberechnung (d.h. längere erste/letzte Meile) ist relativ gering (vgl. Anhang II.1.3 und II.1.4). Dieser geringe Erreichbarkeitsgewinn an einigen Orten lässt folgende Schlüsse zu:

- Das Busnetz und die Anschlüsse an den Knoten sind gut, so dass der Zeitgewinn durch das automatisierte Shuttle gering ist.
- Es werden bei der Erreichbarkeitsberechnung relativ wenige Verbindungen mit aF parallel zum Busangebot berücksichtigt.

- Bei der Berechnung wurde die Kapazität auf der Strasse nicht berücksichtigt, weshalb der Einfluss einer zunehmenden Anzahl von Shuttles gegenüber wenigen Bussen auf die Kapazität nicht berücksichtigt wird. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Engpässe mindestens in den Spitzenzeiten eintreten werden.
- Aufgrund der geringen Erreichbarkeitsgewinne bei dieser Variante und dem Risiko für die Leistungsfähigkeit des Strassennetzes bei gleichzeitig Nachteilen im Ressourcen-Flächenbedarf mit kleineren Einheiten, kann auf konventionelle Buslinien nicht verzichtet werden. Davon ausgenommen sind eventuelle ÖV-Angebote in disperseren Räumen und der mögliche Verzicht auf Umwegfahrten zur Feinerschliessung.

4.4 Fazit und Schlussfolgerungen

Um die Veränderung der Erreichbarkeit durch die beiden definierten Angebotsformen des automatisierten Fahrens festzustellen, wurden Erreichbarkeitsanalysen durchgeführt und Erreichbarkeitspotenziale berechnet. Diese umfassen sowohl das bestehende Angebot als auch die beiden automatisierten Angebotsformen.

Folgende Befunde können auf den drei Ebenen festgehalten werden:

Makro-Ebene

Es gibt Räume, welche besonders durch die Erreichbarkeitsveränderung mit der Variante „kollektives aF auf der letzten Meile ohne Autobahn“ profitieren. Dies sind:

- tendenziell peripherere Lagen urbanen Gebiete, oft am Rand des jeweiligen Siedlungskörpers mit vergleichsweise geringer Nutzungsdichte und grosszügigen Strassenräumen,
- Gebiete mit Bahnanschluss (wiederum vor allem in peripheren Lagen) und
- Zentren der Klein- und Mittelstädte.

Darüber hinaus sind besonders grosse Verbesserungen des Erreichbarkeitspotenzials bei der Variante „kollektives aF auf der letzten Meile mit Autobahn“ in folgenden Räumen feststellbar:

- Umfeld der Autobahnen, insbesondere in peripheren Lagen und in der Nähe der Autobahnauffahrten,
- ringförmig entlang der Autobahnen im Norden und Westen rund um Zürich.

Zudem sind Räume identifizierbar, die bei beiden Varianten kaum oder nur in vergleichsweise geringem Ausmass von Erreichbarkeitsveränderungen profitieren:

- Innenstadt Zürich und
- Zwischenräume, die weder an der Autobahn liegen noch über einen Bahnanschluss verfügen.

Meso-Ebene

Im Kontext der Gebietstypen lassen sich folgende Befunde feststellen:

- In der Variante „kollektives aF auf der letzten Meile ohne Autobahn“ profitieren die dörflichen Gebietstypen (sowohl mit MIV-Orientierung als auch mit Bahnanschluss) sowie Industrie-/Gewerbegebiete mit Autobahnanschluss am meisten.
- Die Variante „kollektives aF auf der letzten Meile mit Autobahn“ führt bei allen Gebietstypen zu einer Verbesserung des Erreichbarkeitspotenzials. Besonders hoch ist diese Veränderung bei den Gebietstypen mit Autobahnanschluss, aber auch bei peripheren Zentrumsgebieten ist eine vergleichsweise grosse Veränderung feststellbar.

Mikro-Ebene

Allgemein lässt sich bei Zoom-In und Betrachtung einzelner Raumausschnitte folgendes festhalten:

- In direktem, fussläufigem Einzugsgebiet von hochrangigen ÖV-Stationen ist die Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials gering.
- Die grössten Veränderungen des Erreichbarkeitspotenzials sind ringförmig um die ÖV-Stationen in nicht fussläufig erreichbaren Räumen zu verorten, meist in typischen Velo-Distanzen.

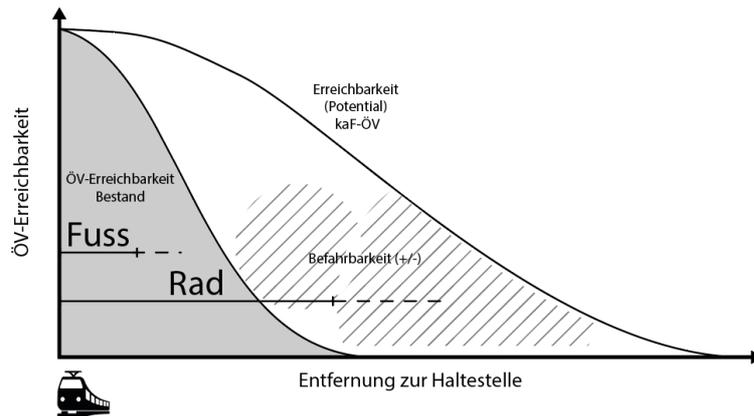


Abb. 45 Die Veränderung der Erreichbarkeit ist besonders bei typischen Velo-Distanzen deutlich – aber auch nur dort, wo eine entsprechende aF-Befahrbarkeit (schraffierte Fläche) gegeben ist.

Generelles Fazit

- Je besser die ÖV-Erreichbarkeit heute ist, umso weniger Potenzial gibt es für Verbesserungen der Erreichbarkeit.
- Für die weitere Betrachtung besonders relevant sind jene Gebiete, in denen die grössten Erreichbarkeitsgewinne nachzuweisen sind. Erreichbarkeit und Befahrbarkeit sollten gemeinsam betrachtet werden: Die Erreichbarkeit heute im Kontext der lokalen aF-Befahrbarkeit bestimmt zukünftig das Verbesserungspotenzial. Diese weitere Betrachtung wurde aber im Rahmen des Projekts nicht durchgeführt.
- Trotz der ausstehenden und im weiteren Forschungsbedarf adressierten Verkehrsmodell-basierten Nachfragemodellierung konnten räumliche Gebiete identifiziert werden, welche bei der Diskussion automatisierter Angebotsformen besondere Aufmerksamkeit zukommen sollte.

4.5 Limitationen und Forschungsbedarf

Limitationen

Der gewählte quantitative Ansatz der Berechnung der Erschliessungsqualität und damit der Erreichbarkeit zur Identifikation von räumlichen Veränderungen wird von einigen Limitationen begleitet. Diese Limitationen wurden während des Forschungsprozesses sowohl intern als auch mit der Begleitkommission diskutiert.

Datenseitige Limitationen

- Durch die Verwendung des TLM als Routing-Grundlage für sämtliche kaF-Angebotsformen ergeben sich möglicherweise Ungenauigkeiten, die darin begründet sind, dass das TLM nicht ohne weiteres nur auf die für aF befahrbaren Kanten reduziert werden kann. Gleichzeitig konnte der TomTom-Graph nicht ohne weiteres als Grundlage für das multimodale GTFS-Routing verwendet werden, da einerseits die aF-Befahrbarkeit auf dem TLM basiert und andererseits auch im TomTom-Graph Erschliessungen fehlen – z.B. Strassenabschnitte, die nur von öffentlichen Verkehrsmitteln (z.B. Bussen) befahren werden dürfen.
- Die Limmattalbahn als grosses neues Infrastrukturprojekt im Ausbau des öffentlichen Verkehrs konnte durch fehlende Datenlage nicht implementiert werden. Die erwarteten Verbesserungen des ÖV-Angebots durch die Limmattalbahn und die begleitenden Umgestaltungen des Busnetzes können darum nicht berücksichtigt werden. Verbesserungen der Erreichbarkeit in ihrem Einzugsbereich beziehen sich auf das Angebot von 2022 und könnten mit dem Fahrplan von 2023 geringer ausfallen. Die Verbesserungen durch die Angebotsform auf der Autobahn sind von dieser Einschränkung nach aktueller Einschätzung ausgenommen. Die Erreichbarkeitsberechnung kann zu einem späteren Zeitpunkt mit den Fahrplandaten von 2023 wiederholt werden, um diese Einschränkung für die Diskussion im RZU-Gebiet auszugleichen.

Limitationen durch den gewählten vereinfachten Modellansatz

- Der gewählte Ansatz, die Erreichbarkeitsmodellierung in ArcGIS Pro zu realisieren, erlaubte zwar eine einfache Umsetzung, hat aber Limitationen in der Kontrolle des Routingalgorithmus: Bei der Routenberechnung wird strikt nach gewählter Impedanz optimiert – d.h. der Weg des geringsten Raumwiderstands gesucht. Der Raumwiderstand ist über die Geschwindigkeit implementiert, was zur Folge hat, dass die Routen- und Distanzberechnung konkret nach kürzester Fahrzeit optimiert wird. Dieser Umstand ist insofern eine wichtige Randnotiz, da bei Verwendung der aF-Modi nicht sichergestellt werden kann, dass diese auch in „planerisch-sinnvoller“ Weise genutzt werden. Qualitative und Komfortkriterien – wie z.B. die Optimierung der Route nach möglichst wenigen Umstiegen bei moderat längerer Fahrzeit – wurden nicht implementiert. Auch Gefässgrössen, Betriebszeiten oder aF-Betriebsgebiete – sowohl im ÖV als auch bei kaF-Angebotsformen – wurden im Rahmen der Analyse nicht berücksichtigt. Ebenso bedingten die fehlenden Kontrollmöglichkeiten über die tatsächliche Routenwahl den Umstand, dass möglicherweise in der Realität wenig sinnvolle Parallelstrukturen zu ÖV-Linien simuliert werden. Dieser Umstand wurde im Zuge der Kalibration berücksichtigt: Hier lag der Fokus auch darauf, auf diesen Parallelverbindungen im ÖV und bei automatisierten Angebotsformen möglichst gleiche Raumwiderstände zu generieren um letztendlich die (ohnehin nicht vorhandene) Erreichbarkeitsveränderung gering zu halten. Die im Rahmen der Analyse durchgeführten Plausibilitätschecks bestätigen, dass dieser Effekt wahrscheinlich nur in geringem Ausmass auftritt.
- Die Optimierung nach Fahrzeit und die fehlende Kontrolle zur Routenwahl haben zur Folge, dass bei einigen Relationen weder ÖV noch kaF-Angebotsformen genutzt werden. Beim ÖV-Netzwerk handelt es sich wie eingangs erwähnt um ein multimodales Netzwerk mit integrierten Fussverkehrsgraphen: Sollten Quell-Ziel-Verbindungen sehr kurz sein oder die ÖV-Verbindung sehr umständlich sein so ist davon auszugehen, dass hier ein Fussweg ohne Nutzung des ÖVs simuliert wird. Bei sehr kurzen Distanzen mag das der Realität entsprechen, bei längeren Verbindungen eher nicht. Diese Verbindungen erhalten durch den absolvierten Fussweg aber eine entsprechend hohe Reisezeit welche wiederum ein geringes Erreichbarkeitspotenzial bedingt. Dies sind Relationen, die von kaF-Angebotsformen in der Regel besonders stark profitieren (=hohes Delta).
- Über die Verwendung des Hektarrasters als Quellpunkte und des 200 m-Rasters als Zielpunkte wird sowohl auf Zustiegs- als auch Ausstiegsseite eine Art Tür zu Tür-Ansatz simuliert. Das Verständnis von automatisierten Angeboten als kollektiver

Verkehr geht davon aus, dass die jeweiligen Fahrten unterwegs mehrere Personen einsammeln und an unterschiedlichen (optimierten) Punkten der Route wieder aussteigen lassen (Pooling-Ansatz). Die entstehenden Verzögerungen und die damit verbundene Reisezeitverlängerung durch Zu- und Ausstiege an Quell bzw. Zielpunkten konnte im Rahmen der Analyse allerdings nicht simuliert werden.

- Auch die integrative Betrachtung der Kombination zwischen automatisierten Angebotsformen und dem Veloverkehr könnte zukünftig eine spannende planerische Fragestellung darstellen. Im Rahmen dieser Analyse wurde die Kombination mit dem Veloverkehr ausgespart und nicht näher betrachtet.
- Die Qualität des automatisierten Angebots und der Implementierung über die Geschwindigkeit auf Basis der aF-Befahrbarkeit stellt nur eine Annäherung dar. Betriebliche Details wie Taktfolgen, Wartezeiten oder Vorausbuchungsfristen können mit dem gewählten Ansatz nicht implementiert werden. Weitere Parameter wie Umsteigewiderstand (sowohl im ÖV als auch beim Wechsel von automatisierten Shuttles zum ÖV und umgekehrt) wurden im Rahmen der Analyse nicht berücksichtigt.
- Die Angebotsform aF-Autobahn wurde im Rahmen der Erreichbarkeitsmodellierung mit einem sehr einfachen Ansatz modelliert, in dem die automatisierten Fahrzeuge jederzeit die Autobahn benutzen und abfahren können (Optimierung des Weges nach kürzester Reisezeit). Die Integration überregionaler Angebotsformen, die Bündelung von Umstiegsvorgängen an Verkehrsdrehscheiben und anderer Add-Ons wurden als weiterer Forschungsbedarf identifiziert bzw. werden am Ende des Berichts weiter diskutiert.

Forschungsbedarf

Aus diesen Limitationen und im Forschungsprozess diskutierten Fragestellungen ergibt sich folgender Forschungsbedarf:

Verwendung eines Verkehrsnachfragemodells

- Im Rahmen der durchgeführten Erreichbarkeitsmodellierung wurde kein Verkehrsnachfragemodell verwendet und auch keine Belastungen im Netz simuliert. Es gibt Forschungsbedarf bei der Erweiterung der durchgeführten Analyse mit Ergebnissen aus diesen erwähnten Verkehrsnachfragemodellen, wobei auch für diese eigene Angebotsformen zuerst definiert und implementiert werden müssten.
- Mit den Ergebnissen aus dem Verkehrsnachfragemodell und weiteren Auslastungs- und Nachfrageindikatoren könnte die Betrachtung detaillierter für evident-sinnvolle Bereiche durchgeführt werden.
- Im Rahmen von Verkehrsnachfragemodellen könnten unterschiedliche Betriebs- und Angebotsformen von automatisierten Shuttles simuliert und verglichen werden.
- Zu den Auswirkungen der automatisierten Angebotsformen hinsichtlich CO₂-Bilanz sowie weiteren klimarelevanten Indikatoren (Flächenverbrauch, Ressourcenschonung, ...) besteht weiterer Forschungsbedarf. Voraussetzung dafür ist ebenfalls ein Verkehrsnachfragemodell

Betriebsparameter für automatisierte Angebotsformen

- Die im Bereich der ÖV-Modellierung übliche Gewichtung der empfundenen Reisezeit durch unterschiedliche Parameter (Zugangszeit, Abgangszeit, Umsteigezeit, ... - vgl. Vrtic et al. 2005) sollte auch im Kontext der Modellierung automatisierter Angebotsformen untersucht werden.
- Die Integration von Verkehrsdrehscheiben am Übergang vom niederrangigen zu höherrangigen automatisierten Angebotsformen und deren Integration in Erreichbarkeits- oder Verkehrsmodellierungen stellt eine weitere Aufgabe für die Forschung dar. Neue oder bestehende Standorte für diese Verkehrsdrehscheiben müssten zuvor mit einem definierten Betriebskonzept identifiziert werden, wobei dieses

Konzept auch Zufahrten und Leerfahrten zu und von Depots und Wartepätzen berücksichtigen sollte.

Tools für die Raumanalyse automatisierter Angebotsformen

- Das Potenzial der aF-Befahrbarkeit kann nicht in allen Räumen genutzt werden – besonders dann, wenn einzelne, kürzere Infrastrukturabschnitte die Abgrenzung grösserer ODDs verhindern – sog. Bottlenecks. Es gilt zukünftig Tools zu entwickeln, die diese Bottlenecks auf Basis noch zu definierender aF-Betriebsformen verlässlich identifizieren und so eine Diskussionsgrundlage für mögliche Anpassungen der Infrastruktur darstellen.

5 Veränderte Flächenbedarfe durch kollektive, automatisierte Angebotsformen im Level 4

5.1 Einleitung

Wie bei Mobilitätsinnovationen in der Vergangenheit, sind auch beim automatisierten Fahren neben verkehrlichen auch räumliche Wirkungen zu erwarten. Die zentrale Grösse, die Raumnutzung und Verkehr aneinanderbindet, ist die Erreichbarkeit (siehe Abb. 1, bzw. Kap. 4). Zu diesen räumlichen Wirkungen liegen bereits verschiedenste Studien vor. Es zeigt sich, dass das Spektrum möglicher Effekte gross und wesentlich von dem lokalen, verkehrlichen und räumlichen Kontext abhängig ist (Soteropoulos 2019). Veränderungen innerhalb dieses Gefüges folgen unterschiedlichen Geschwindigkeiten: eine Veränderung im Verkehrssystem (z.B. durch den Einsatz von kaF in einem aF-Betriebsgebiet) führt unmittelbar zu einer Veränderung der Erreichbarkeitsverhältnisse. Damit dieser geänderte Zustand im Mobilitätssystem wirksam wird, muss sich erst das Mobilitätsverhalten ändern. Dies passiert innerhalb von Tagen bis wenigen Jahren, während sich das Standortwahlverhalten (von Personen und Betrieben) in der Dimension von einigen Jahren bis Jahrzehnte verändert (Bertolini 2017). Diese indirekten räumlichen Wirkungen wurden vor allem mit Simulationsstudien - auch für die Schweiz - untersucht. Auf Grund der relativ kurzen Distanzen die im Pendelverkehr in der Schweiz zurückgelegt werden, kam man zum Schluss, dass die Gefahr für weitere Zersiedelung eher gering sei (Del Duce, Trachsel & Hoerler 2020).

KaF wäre allerdings nicht allein auf diese Art raumwirksam. Ein direkter Zusammenhang besteht zu veränderten Platzbedarfen im Strassenraum (Fahrbahn, Parkierungsflächen) und auch zu einer ganzen Reihe von weiteren assoziierten, raumwirksamen Funktionen (Tankstellen, Waschanlagen, Depots und Serviceeinrichtungen), die gemeinsam hier im Fokus stehen.

Der in dieser Studie gesetzte Fokus auf kaF im Level 4 (vgl. Kap. 1.4) lässt bezüglich der räumlichen Wirkungen eine Zuspitzung des Untersuchungsgegenstandes zu: Es geht primär um eine geänderte Flächeninanspruchnahme in tauglichen kaF-Betriebsgebieten, die durch das Auftreten der neuen Angebotsform(en) (vgl. Abb. 7) ergibt. Für aF-Betriebsgebiete werden in der Literatur auch andere Begriffe verwendet. Der Begriff der Operational Design Domain (ODD, SAE J3016; vgl. Kap. 3.2.1) stellt den Zustand der relevanten Umfeldbedingungen in den Fokus; jener der Level 4-Inseln (Jermann et al. 2020: 46-48, Mitteregger et al. 2020: 139) impliziert einen klar begrenzten Raum. Daraus ergibt sich eine weitere Entwicklungsdynamik, die bereits an unterschiedlichen Stellen dokumentiert wurde. Unter der Annahme des Level 4 und dem Einsatz von kaF in aF-Betriebsgebieten treten sowohl direkte als auch indirekte Wirkungen nur in diesen Teilen des Siedlungsraumes auf, was zu einer Destabilisierung des verkehrlich-räumlichen Gefüges führen kann (Mitteregger et al. 2020). Eine derart selektive Steigerung der Erreichbarkeit hat bei Verkehrsmitteln in der Vergangenheit u.a. dafür gesorgt, dass Standortorte, die besonders früh erschlossen wurden, wirtschaftlich und sozial überproportional von den Erreichbarkeitsgewinnen profitiert haben, während bei Standorten, die spät in ein dann schon bestehendes Verkehrsnetz integriert wurden, tendenziell negative Effekte (u.a. Abwanderung von Betrieben in bestimmten Sektoren, induzierte Verkehre) erkennbar waren (Deng 2013).

Vor dem Hintergrund dieser Zuspitzung wird im ersten Abschnitt der State of the Art zu direkten räumlichen Wirkungen beschrieben und mit dem Fokus nach zeitlich naheliegenden bzw. fernen Effekte differenziert. Darauf aufbauend wird eine Abschätzung der geänderten Flächeninanspruchnahme vorgenommen, die aufgrund sehr unterschiedlicher Datenverfügbarkeiten von einer groben Näherung bis zu einer eigens durchgeführten Berechnung reicht. Mit dieser Erhebung als Basis, werden im Fallbeispiel des RZU-Gebiets im Abschnitt oben bereits beschriebenen Areale von Schlieren/Urdsorf (vgl. Kap. 4.3.3) (Angebotsform kollektives automatisiertes Fahren auf der letzten Meile) und Schlieren, Dietlikon, Regensdorf und Urdsorf/Bergermoos (kollektives automatisiertes

Fahren auf der Autobahn) untersucht. Abschliessend werden die gewonnenen Erkenntnisse in einem Fazit zusammengeführt.

5.2 Stand der Forschung

Die räumlichen Wirkungen des automatisierten Fahrens waren schon früh Gegenstand des Diskurses (Cyganski 2015, Lenz & Fraedrich 2015) und erzeugten einige Aufmerksamkeit in Stadt- und Regionalforschung (Heinrichs 2015) und ebenso in der Planungspraxis, wo vor allem das mögliche Potenzial zur Neuverteilung des öffentlichen Raumes diskutiert hat.

Ältere Studien gingen dabei von sehr hohen Flächenpotenzialen aus, die entstehen sollten, wenn durch den Einsatz von automatisierten Car- bzw. Ridesharing Angeboten Parkierungsflächen in hohem Mass freigesetzt würden. Auch im Strassenraum sah man hohe Effizienzsteigerungen, die durch geringere Abstände zwischen den Fahrzeugen (Fahrzeugfolgezeiten) erreicht würden. Studien untersuchten die Umnutzungen von freierwerdenden (Parkplatz-)flächen in Grünanlagen (Winkelhake 2017: 329) oder Flächen für den Fuß- und Veloverkehr (Oehry et al. 2020: 76). Auch eigene Fahrbahnen für den automatisierten Verkehr wurden in Betracht gezogen (Hörl et al., 2019, S. 28).

Die tatsächliche Reduktion des Flächenbedarf des motorisierten Straßenverkehrs wäre wesentlich davon abhängig, wie viele Fahrzeuge im Strassennetz automatisiert (und vernetzt) sind und ist somit wesentlich eine Frage der Durchdringung und der Zeit. Für die Schweiz gehen Forschungen des ASTRA davon aus, dass tatsächliche Effizienzgewinne im Fahrbahnbereich und darüber hinaus erst bei einer sehr hohen Flottendurchdringung (> 60%) und einem hohen Anteil an kollektiven Nutzungen entstehen, die nicht vor 2050 erwartet werden (Axhausen et al. 2020: 18, TP5: 8). Nachstehend werden die für die vorliegende Untersuchung relevanten Diskurslinien umrissen. Es werden in erster Linie Flächentransformationen betreffend Fahrbahnen, Parkieren und anderer assoziierter Funktionen erläutert. In Kapitel 1.2.4 wird darauffolgend explizit auf potenzielle Nutzungskonflikte verwiesen, die aus den Veränderungen entstehen könnten.

5.2.1 Fahrbahn

Höhere Präzision der Steuerungstechnik und umfassende Vernetzung der Verkehrsteilnehmenden sind die Voraussetzung dafür, dass Fahrbahnbreiten verringert und Verkehrsdichten durch Automatisierung vergrössert werden können (EBP 2017). Diese kapazitätssteigernden Wirkungen könnten zu einer Reduktion des Strasseninfrastrukturbedarfes führen (Friedrich 2015). Diese wurden für unterschiedliche Strassentypen erhoben und auch auf Kreuzungssituationen – hier könnten etwa 30% an Kapazität zugelegt werden - angewandt (Brake 2016, ASTRA TP2). Allerdings zeigt der wissenschaftliche Diskurs immer deutlicher, dass diese Gewinne erst sehr spät, nämlich in einem Verkehrssystem mit einem hohen Durchdringungsgrad von automatisierten Fahrzeugen einzulösen wären. Auch verkehrliche Effekte, wie etwa eine Steigerung der Verkehrsdichte (durch kürzere Fahrzeugfolgeabstände), werden für geringere Durchdringungsraten nicht gesehen. Im Gegenteil: die Verkehrsdichte könnte durch sehr passives Fahrverhalten der Fahrzeuge, die sich vorsichtiger im Straßenverkehr bewegen könnten als dies menschliche Fahrer:innen tun, abnehmen (ASTRA TP5: 11) und auch die allgemeine Zuverlässigkeit (in Bezug auf die Reisezeit) könnte durch funktionsunfähige automatisierte Fahrzeuge sinken (Goodall 2021).

Reduktion der Fahrstreifenbreite

Wird angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge zuverlässiger und mit höherer Präzision als menschliche Fahrende navigieren, kann eine Reduktion der Fahrstreifenbreite erreicht werden. Zudem könnten die heute üblichen (statischen) Markierungen im Strassenraum obsolet werden, da automatisierte Fahrsysteme die verkehrsgestaltenden Informationen aus digitalen Quellen beziehen und auch die optimale Spurenanzahl je nach Geschwindigkeit und Verkehrsaufkommen wählen. In diesem Fall wäre ebenso mit einer Reduktion des Platzbedarfes zu rechnen. Aber auch da zeigt sich,

dass diese Effekte nur sehr spät und vor allem auf Strassen ohne Velo- und Fussverkehr eintreten würden (Busch et al. 2020: 138).

5.2.2 Parkieren / Halten

Steigt der Auslastungsgrad der Fahrzeuge durch Car- bzw. Ridesharing, sinken die Parkierungsdauern, was wiederum zu einer Reduktion des Parkraumbedarfs führt. Dieser Effekt ist mittels Simulationsstudien gut dokumentiert (Soteropoulos 2019). Auch hier gilt, dass die Effekte wesentlich von einer hohen Durchdringung der Gesamtflotte und einem veränderten Nutzungsverhalten abhängen. In Studien, die Effekte auf das Parkieren mit extrem hohen oder einer vollständigen Durchdringung von automatisierten Sharing-Fahrzeugen betrachtet haben, konnte eine Reduktion des Bedarfs für Parkierungsflächen von 80-90% (ITF 2015, Zhang et al. 2015, in Zhang & Wang, 2020) nachgewiesen werden. In der Stadt Lissabon beispielsweise könnte bei einem Anteil von 80% automatisierten Carsharing-Fahrzeugen eine Fläche von 210 Fussballfeldern freierwerden (Zhang u. Guthathakurta, 2017 in Zhang u. Wang, 2020). Zudem wurde angenommen, dass aufgrund genauerer Parkungsverhältnisse zusätzlich Fläche eingespart werden könnte (Bertoncello & Wee in Hörl et al. 2015: 28).

Pick-up und drop-off-Zonen

Auch wenn k-aF aufgrund der höheren Nutzung weniger ruhen, d.h. weniger Parkierungsflächen beanspruchen, braucht es zusätzlich Infrastruktur in Form von Pick-up und drop-off Zonen, um diese Angebotsform erst zu ermöglichen (ITF 2018). Die Gestaltung dieser neuen Schnittstellen im Verkehrssystem ist, wie im klassischen ÖV, von Faktoren wie dem erwarteten Verkehrsaufkommen vor Ort und von anderen verfügbaren Verkehrsmitteln abhängig. Allgemein ist für die Integration die bestehende Netzhierarchie eine zentrale Einflussgrösse. (vgl. Abb. 46)

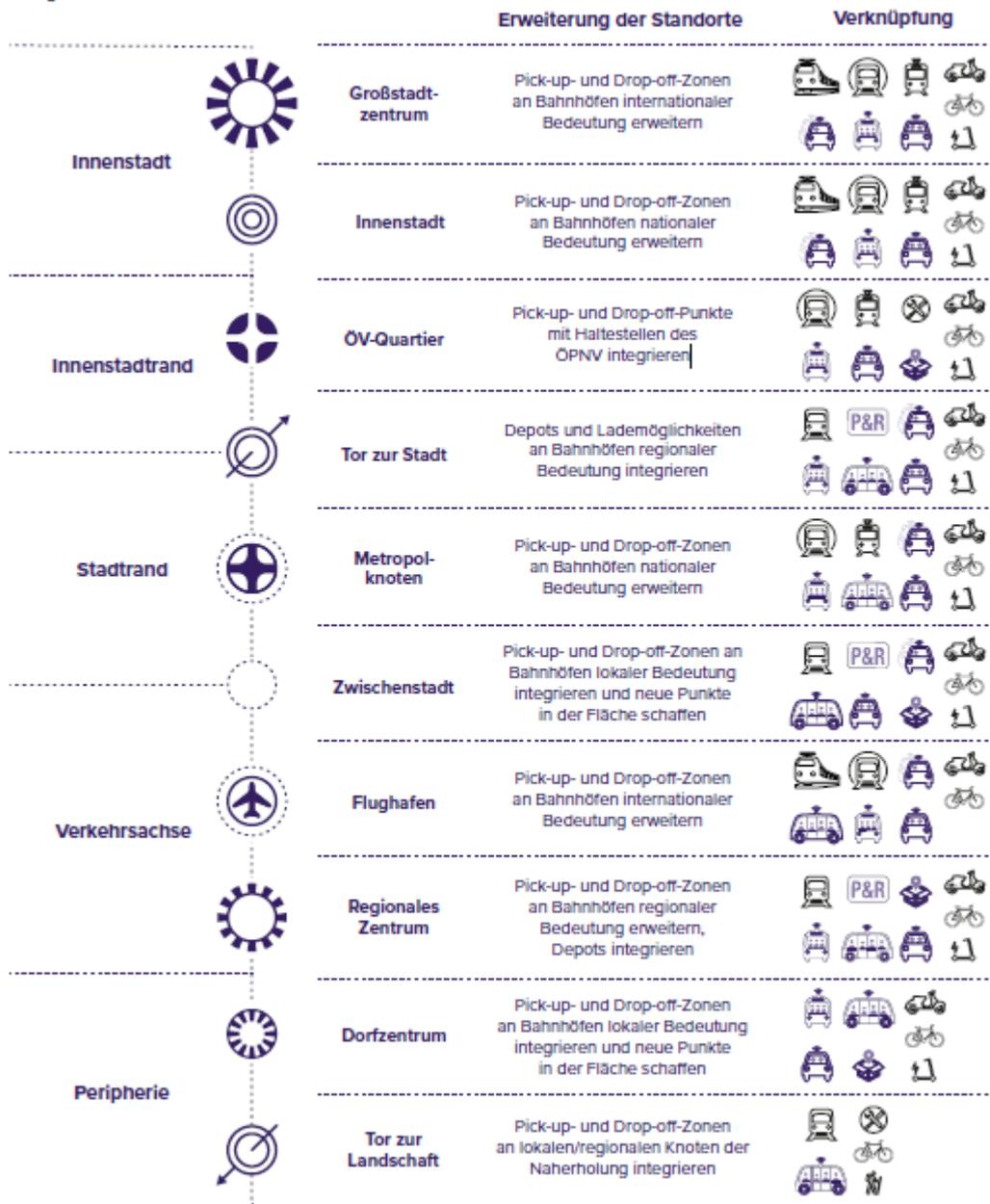


Abb. 46 Integration von Pick-up und drop-off Zonen an unterschiedlichen Stationstypen, je nach Verkehrsraumtypen (Bruck, Scheuven & Berger 2021: 142)

Automatisierung - hier vor allem auch eine Vernetzung zwischen Fahrzeugen - lässt es zu, über eine dynamische Nutzung (nach Tageszeit oder bezogen auf Anlässe) nachzudenken. So wäre es denkbar, dass in den Morgen- und Abendstunden die Pick-up-/Drop-off-Bereiche für die Anlieferung von Waren genutzt werden könnten. In der Zeit dazwischen könnten diese Flächen kollektiven Angebotsformen im Personenverkehr zugeschlagen werden. Weiters wäre auch eine dynamische Veränderung von aF-Betriebsgebieten für automatisierte Bedarfsverkehre möglich. Diese könnten in Tagesrandzeiten ausgeweitet werden und während der Betriebsstunden des klassischen ÖV schrumpfen (Martin et al. 2021).

Parkierungsanlagen als Teil der Angebotsplanung von kollektiven automatisierten Angebotsformen

Für grössere Flotten in einem aF-Betriebsgebiet konnte gezeigt werden, dass auch für automatisierte Fahrzeuge das Management der Parkierungsflächen ein zentraler

verkehrspolitischer Hebel sein dürfte (Winter et al. 2021). Wird davon ausgegangen, dass es kollektiv-genutzten automatisierten Fahrzeugen zu Zeiten, wo keine Buchungen vorliegen, untersagt ist Leerfahrten durchzuführen, bieten die verfügbaren Parkplatzflächen neue Möglichkeiten: es ergeben sich so weitere Angebote, um an bestimmten Stellen Fahrzeuge vorhalten zu können (Abb. 1).

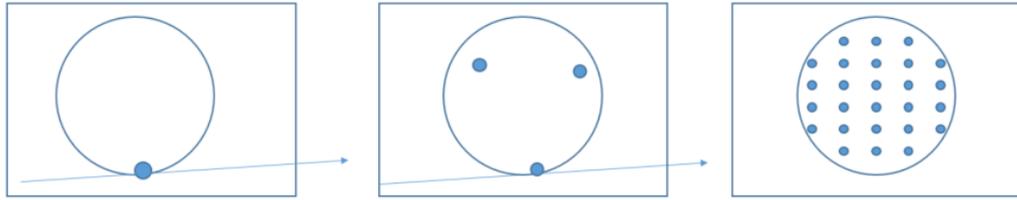


Abb. 47 Schema des Managements von Parkierungskapazitäten für kollektives aF: Konzentration nicht benutzter Fahrzeuge an einem Punkt (z.B. Bahnhof), Vorhalten von Kapazitäten nahe verkehrsinduzierender Funktionen und gleichmässiges Verteilen im aF-Betriebsgebiet (eigene Darstellung nach Winter et al. 2021).

Winter et al. haben unterschiedliche Varianten des Parkplatzmanagements für kollektives aF untersucht (siehe Abb. 47). Die Varianten reichen von einer gleichmässigen Verteilung im Betrachtungsgebiet bis hin zu einem gezielten Vorhalten von Kapazitäten an stark verkehrsinduzierenden Nutzungen. Letztere könnten im hier betrachteten Fall durchaus auch S-Bahnstationen oder andere Verkehrsdrehscheiben sein, die das neue automatisierte Angebot in das bestehende ÖV-System integrieren. Die Autor:innen konnten zeigen, dass eine möglichst gleichmässige Verteilung der Fahrzeuge im aF-Betriebsgebiet die geringsten Wartezeiten und Staus verursacht. Eine Nachnutzung bestehender Parkplatzflächen wäre ebenfalls leicht möglich (Winter 2021). Die genannten Vorteile treten allerdings zu Ungunsten einer höheren Verkehrsleistung auf. Dieser Rebound-Effekt fällt am geringsten bei einer gezielten Konzentration nahe starker Verkehrserzeuger aus.

5.2.3 Weitere assoziierte Funktionen

In der Literatur zur Flächeninanspruchnahme unterschiedlicher Verkehrsmittel stehen die oben angeführten Bedarfe im Strassenraum (fahren und parken) im Fokus. Ein Blick auf die heutige Siedlungsstruktur zeigt allerdings, dass zahlreiche weitere Pkw-assozierte Funktionen im Raum verteilt zu finden sind. Wir sprechen hier im engeren Sinn von Pkw-assozierten Flächen bzw. Betrieben (und nicht von Kfz-assozierten Flächen), da die hier betrachteten Angebotsformen des kaF in Konkurrenz zum Pkw stehen und nicht allgemein zu Kfz. Unter anderem handelt es sich hierbei um Tankstellen, Waschanlagen oder Autohäuser. Diese prägen auf charakteristische Weise die Siedlungsstruktur der Automobilität und stellen einen konzeptionellen Wandel gegenüber dem Eisenbahnzeitalter dar, wo alle für den Betrieb und die Wartung notwendigen Funktionen an möglichst wenigen Punkten – an Depots oder Betriebsbahnhöfen – im System konzentriert waren (Mitteregger & Soteropoulos 2021).

Mit dem Blick auf die Vergangenheit zeigt sich, dass die Betriebsstätten des Bahnzeitalters wichtig für die Stadtentwicklung waren. Da aufgrund der betrieblichen Logik des öffentlichen Verkehrs möglichst viele Funktionen an einigen wenigen Punkten im Netz konzentriert werden, sind dies grosse, zusammenhängende Areale, die meist als städtebauliche Barrieren wahrgenommen werden. Viele dieser Areale büssten mit dem Bedeutungsverlust der Bahn (vor allem im Gütertransport) in der Nachkriegszeit an Bedeutung ein und wurden bereits anderen Nutzungen zugeführt. Kollektive Angebotsformen automatisierter Fahrzeuge könnten einen ähnlichen Wandel antreiben bzw. zu einer erneuten räumlichen Konzentration führen, die näher am klassischen ÖV-System liegt als an der dispersen Verteilung Pkw-assoziierter Flächen (Tab. 23).

Veränderungen bei assoziierten Funktionen ereignen sich tendenziell mittel bis langfristig, weil eine veränderte Nachfrage auf die weiteren assoziierten Funktionen bewirkt. Das

privatwirtschaftliche Angebot (und die Nachfrage) rund um das Auto ist (sind) zudem bezüglich kurzfristiger, wirtschaftlicher Veränderungen anfällig (Rothengatter 2011), was für eine möglicherweise recht kurzfristige Dynamik in kaF-Betriebsgebieten spricht.

Tab. 23 Räumlich relevante assoziierte Funktionen ausgewählter Transportmittel entlang des Produktlebenszyklus (Mitteregger & Soteropoulos 2021: 318)

Transportmittel	Pkw	ÖPNV (Bus)	Kollektives aF
	Fahrzeughersteller Fahrzeughandel		Fahrzeughersteller
	Strassennetz Parkierungsanlagen Tankstellen Waschanlagen (...)		Strassennetz Haltestellen Verkehrsdrehscheiben Betriebsbahnhöfe oder Depots
	Gebrauchtwagenhandel Recyclinganlagen, Schrottplätze		Recyclinganlagen, Schrottplätze

Depots für kollektives aF

Betriebliche Voraussetzungen von kollektiven automatisierten Angebotsformen die jenen des ÖV ähneln, sprechen für eine räumliche Zentralisierung assoziierter Funktionen. Vorformen eines neuen Gebäudetypus könnten die Depots der Fahrdienstleister darstellen, die charakteristische städtebauliche Eigenschaften aufweisen. Sie befinden sich in Lagen mit hohen Flächenverfügbarkeiten und an Autobahnabfahrten (Mitteregger & Soteropoulos 2021). Für diese Depots zeichnen sich darüber hinaus bestimmte Ausstattungsmerkmale ab. Es wird erwartet, dass die Wartung bzw. Reinigung von automatisierten Fahrzeugen eine besondere Herausforderung darstellen dürfte (Compostella et al. 2020), dass eventuell Leitstellen für ein überwachendes Personal benötigt oder auch das (automatisierte) Laden hier erfolgen wird (Yi & Smart 2021).

Verkehrsdrehscheiben für kaF

Damit automatisierte Fahrzeuge in das bestehende ÖV-Angebot integriert werden können, bedarf es Verkehrsdrehscheiben, die sich in die bestehende Hierarchie des öffentlichen Verkehrssystems eingliedern (Abb. 46). Bei der Anwendungsform kollektives automatisiertes Fahren auf der Autobahn geht dieser Anspruch noch weiter. Dieser Use Case ist überhaupt erst mit dieser zusätzlichen Infrastruktur denkbar. An allen Autobahnabfahrten, wo dieses Angebot verfügbar gemacht werden soll, müssten Verkehrsdrehscheiben entstehen, die einen sicheren und komfortablen Übergang von einem Verkehrsmittel zum nächsten ermöglichen (siehe z.B. Abb. 46 «Tor zur Stadt»). Aufgrund der hohen Kapazitäten auf der Autobahn wären diese Knoten wahrscheinlich von hoher bis sehr hoher verkehrlichen Bedeutung – mit einer entsprechenden Frequenz von Fahrgästen (Chen et al. 2020).

5.2.4 Zwischenfazit: die Relevanz räumlicher Wirkungen des kollektiven aF im Fallbeispiel

Die verkehrlichen Herausforderungen des Mischverkehrs, die Zeit während derer sich automatisierte und nicht-automatisierte ebenso wie nicht motorisierte Verkehrsmittel den Strassenraum teilen, sind auch für die Schweiz gut dokumentiert (Busch et al. 2020). Der hier umrissene Forschungsstand zu direkten räumlichen Wirkungen zeigt eine Ungleichzeitigkeit von neuauftretenden Flächenbedarfen und freiwerdenden Flächen bzw. einer reduzierten Flächeninanspruchnahme (siehe Tab. 24).

Tab. 24 Übersicht zur Zeitlichkeit direkter räumlicher Effekte im Übergang von Pkw zu kollektivem aF

	Kurzfristig		Mittelfristig		Langfristig	
	+	-	+	-	+	-
	Steigender Bedarf	Sinkender Bedarf	Steigender Bedarf	Sinkender Bedarf	Steigender Bedarf	Sinkender Bedarf
Fahrbahn	Mögliche Kapazitätsverluste; fehlerhafte aF und Nutzungskonflikte v.a. mit Fuss- und Veloverkehr					Bei hoher Durchdringung: Effizienzsteigerung vor allem auf A+S Strassen
Parkieren / Halten	Flächen für parkende kollektive Angebotsformen im aF-Betriebsgebiet		Gleichzeitigkeit automatisierter und nicht-automatisierter Angebotsformen führen zu erhöhtem Park- bzw. Halteflächenbedarf			Reduktion des Parkplatzflächenbedarfs bei hoher Durchdringung von kollektiven Angebotsformen
Assoziierte Funktionen	Bedarf an Depots in aF-Betriebsgebieten		Zusätzliche Flächenbedarfe durch konkurrierende Fahrdienstleister	Vereinzelte freiwerdende Flächen, wo k-aF etabliert ist	Mögliche Pluralisierung assoziierter Funktionen	Freiwerden Pkw-assoziierter Funktionen wo sich automatisierte Angebotsformen durchsetzen
Verkehrsdrehscheiben	Use Case letzte Meile: Bedarf an den Schnittstellen zu und innerhalb von aF-Betriebsgebieten Use Case Autobahn: Flächenbedarf für Verkehrsdrehscheibe «Tor zur Stadt»		Bedarf in Siedlungsgebieten, an Bahnhöfen, Wohnquartieren Anfang an Autobahnen Flächen fürs Mitfahren bereitzustellen	Möglich: (teilweises) Umnutzen von P&R Anlagen an ÖV-Knoten	Bedarf an Siedlungsrändern, bei hochrangigen Verkehrsknoten und stark verkehrsinduzieren den Nutzungen	

Wann die Effekte nun im hier untersuchten Fallbeispiel des RZU-Gebiets einsetzen, ist davon abhängig, wie schnell die Durchdringung von kaF angenommen wird. Szenarien, die für die Schweiz (räumlich differenziert) und für Zürich zum einen als verkehrspolitische Zielsetzungen und zum anderen im Sinne einer Prognostik für mögliche Anteile von kaF gebildet wurden, lassen eine erste Näherung zu.

Der Anteil am Bestand von automatisierten Fahrzeugen (sowohl individuell als auch kollektiv genutzt) wird für 2040 bei etwa 6% gesehen (Szenario Basis, Justen et al. 2022: 103). Eine Studie des ASTRA geht von einer ähnlichen Entwicklung aus und sieht den Anteil von kollektiv-genutztem aF ohne steuerndes Eingreifen bei 0,06% für 2050. Die Studie im Auftrag des ASTRA stellt allerdings auch fest, dass ein derart geringer Anteil an der Gesamtflotte eine «langanhaltende Herausforderung» darstellen würde und dass der zentrale Mechanismus der Steuerung das Fördern kollektiver Angebotsformen ist (Fehlberg et al. 2020: 36). Durch gezielte Förderung könne der Anteil auf etwa 1/3 aller automatisierten Fahrzeuge gehoben werden.

Es muss berücksichtigt werden, dass diese Prognosen ohne räumliche Differenzierung arbeiten. In unterschiedlichen Studien wurde argumentiert, dass sowohl eine selektive Befahrbarkeit des Strassennetzes für aF als auch die jeweils denkbaren Anwendungen dazu führen werden, dass der Anteil im Siedlungsraum stark variiert. EBP, die in ihrer Studie für den Kanton Zürich vor allem die Nachfrageseite betrachtet haben, gehen davon aus, dass der ÖIV- Anteil in der Kernstadt bis zu 17% des Modal Spilt und im Agglomerations- bzw. ländlichen Raum nur bei 4% im Jahr 2040 liegen könnte (EBP 2018: 5). Studien, die die Befahrbarkeit berücksichtigen, sehen eine diametrale Entwicklung (Bruns et al. 2018). Jermann et al. weisen darauf hin, dass unter Berücksichtigung der technologischen Machbarkeit die Durchsetzung von einigen Angebotsformen erst verspätet einsetzen könnte (Jermann et al. 2020: 49-51). Del Duce et al. 2020 sehen bei der mittelfristigen Entwicklung (bis 2035) Erreichbarkeitsgewinne in ausgewählten aF-Betriebsgebieten, die auch dazu führen können, dass sich die Standortattraktivität zu verlagern beginnt (Del Duce et al. 2020: 87).

Dies bedeutet für die Flächenentwicklung, dass zum einen Platzbedarfe selektiv und konzentriert in einigen Arealen entstehen könnten, die als aF-Betriebsgebiete freigegeben sind. Die mittel- und langfristige Entwicklung wäre zudem wesentlich davon abhängig, wie vielfältig sich der Markt von Angeboten des kollektiven aF entwickelt: Entsteht ein heterogener Markt, in dem viele Anbieter in unterschiedlichen oder sich überschneidenden aF-Betriebsgebieten in Konkurrenz stehen, sind stärker Nutzungskonflikte zu erwarten, ähnlich wie sie heute z.B. bei E-Scootern auftreten und auch für free-floating Carsharing dokumentiert sind (Balac et al. 2017). Für eine Agglomeration wie das hier betrachtete RZU-Gebiet, das sich auf ein zu erwartendes Bevölkerungswachstum ausschliesslich mit einer Siedlungsentwicklung nach innen und einer effizienteren Flächennutzung vorbereiten möchte, kann dies eine grosse zusätzliche Herausforderung darstellen.

5.2.5 Potenzielle Nutzungskonflikte

Die nachfolgend genannten Nutzungskonflikte können in verschiedenen Bereichen auftreten. Zunächst wird der potenzielle Nutzungskonflikt zwischen automatisierten Fahrzeugen und dem Fuss- und Veloverkehr thematisiert. Doch auch im Zuge der Halteflächen könnten Nutzungskonflikte mit dem konventionellen ÖV auftreten.

Nutzungskonflikte im Strassenraum

Reduktion der Fahrzeugfolgeabstände und damit dichter (motorisierter) Verkehr erhöhen die Trennwirkung im Strassenraum. Dies hätte negative Effekte für den Fuss- und Veloverkehr bzw. innerorts für anliegende Nutzungen und Nutzer:innen im Strassenraum zur Folge. Dieses Problem ist nicht nur eines, dass erst mit einer hohen Durchdringung einsetzt, da der Fuss- und Veloverkehr für automatisierte Fahrsysteme eine besondere technische Herausforderung darstellt (Favarò et al. 2018, siehe oben Kap. Tauglichkeit) und damit verkehrliche Konfliktsituationen wahrscheinlich werden. Diese Probleme treten tatsächlich in den aF-Betriebsgebieten auf, wo heute bereits eine grössere Zahl automatisierter Fahrzeuge eingesetzt werden (Soteropoulos et al. 2022). Darüber hinaus darf nicht vergessen werden, dass der innerstädtische Strassenraum nicht allein verkehrlichen Zwecken dient, sondern für die Nutzenden vor Ort ein wichtiger öffentlicher Freiraum ist. Ein lebendiger Strassenraum, belebt durch angrenzende Nutzungen oder temporäre Veranstaltungen (z.B. Märkte), könnte eine grosse Herausforderung für die Steuerung automatisierter Fahrsysteme darstellen (Mitteregger et al. 2020).

(Virtuelle) Haltepunkte für kollektives aF und bestehende Parkierungsanlagen

Für eine kollektive Angebotsform stellen (virtuelle) Haltepunkte einen essentiellen Teil der Infrastruktur für die beiden vorgestellten Angebotsformen dar (siehe Kap. 1.4). Um diese (virtuellen) Haltepunkte zu gestalten, können u.a. Parkplätze oder bereits bestehende Haltbuchten des ÖV mit- bzw. umgenutzt werden. Bush et al. 2020 verweisen auch hier auf mögliche Nutzungskonflikte während der Übergangszeit, die auch Winter et al. 2021 betonen: während sehr frühen Test- oder Betriebsphasen ist es durchaus denkbar, dass ÖV-Haltestellen mitgenutzt werden. Ab einer höheren Anzahl von automatisierten Fahrzeugen und einer zunehmenden Dichte der Haltepunkte (z.B. 150-200 m, mit denen heutige Fahrdienstleister im urbanen Raum teils planen) ist anzunehmen, dass die Mitnutzung zusehends problematisch wird und zusätzliche Flächen notwendig werden. Dies gilt auch für die Umnutzung von Parkierungsanlagen.

5.2.6 Strassenräumliche Verträglichkeit

Die oben beschriebenen Nutzungskonflikte durch den Einsatz automatisierter Fahrzeuge führen letztlich auch zu der Frage, inwieweit der Einsatz automatisierter Fahrzeuge aufgrund der mit ihnen verbundenen Wirkungen wie einer Zunahme der Verkehrsleistung sowie einer Erhöhung der Trennwirkung durch eine dichtere Fahrzeugfolge mit den übrigen Nutzungsansprüchen an den Strassenraum verträglich ist. Letztlich sind Konflikte zwischen den Ansprüchen des motorisierten Verkehrs und anderen Bedürfnissen, insbesondere von Fuss- und Veloverkehr, an den Strassenraum nur bis zu einer gewissen Intensität verträglich bzw. von der konkreten Situation zumutbar. Problematisch wird es

insbesondere dann, wenn durch den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen in Strassenräumen die Verkehrsbelastung über diese Grenze steigt und eine Dominanz erreicht, welche die übrigen Nutzungsansprüche in nicht mehr verträglichem Ausmass beeinträchtigt (vgl. Bühlmann & Laube 2013:10). Vor allem in Strassenräumen bzw. Gebieten, bei denen bereits die derzeitige Verkehrsbelastung durch motorisierten Verkehr kaum verträglich mit den Ansprüchen aus dem Strassenumfeld sind, sollte von einem Einsatz automatisierter Fahrzeuge abgesehen werden (vgl. Soteropoulos 2021: 68).

5.3 Abschätzung der Flächenentwicklungsdynamik

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Erreichbarkeitsanalyse (Kap 4) mit dem aktuellen Forschungsstand zu sich wandelnden Flächenbedarfen zusammengeführt. Für die beiden Angebotsformen werden jeweils zunächst auf Basis der af-Befahrbarkeit und der Erreichbarkeitsanalyse mögliche aF-Betriebsgebiete festgelegt, deren Eigenschaften beschrieben und anschliessend eine Abschätzung möglicher Flächeninanspruchnahme durchgeführt. Die Auswahl der beiden aF-Betriebsgebiete wurde in einem Workshop mit Planungsakteur:innen der Region (vgl. Kap 6) reflektiert. Abschliessend werden aus diesen Überlegungen in Kapitel 7 Handlungsbedarfe für eine kontrollierte Einführung kollektiver Angebotsformen des aF abgeleitet.

Datenverfügbarkeit und methodisches Vorgehen

Wie in Tab. 25 ersichtlich ist, variiert die Datenverfügbarkeit im Fallbeispiel des RZU-Gebietes stark. Für die Stadt Zürich sind Parkierungsflächen im öffentlichen Raum gut erfasst. Über die Daten des STATENT existieren ausserdem Daten zu Parkhäusern und anderen Parkbauwerken. Parkflächen im privaten Raum sind nicht erfasst. Für den Rest des RZU-Gebietes gibt es keinen praktikablen Datensatz für die Parkierungsanlagen. Diese wären über die Arealstatistik des Bundesamts für Statistik nur sehr grob abzuleiten. Aus diesem Grund wird eine Quantifizierung als Näherung mithilfe von Literatur durchgeführt.

Tab. 25 Datenverfügbarkeit und Quellen zur Quantifizierung direkter räumlicher Wirkungen

	Quelle / Jahr	Art	Gebiet	Kommentar
Strassen	Kurz- und mittelfristige Wirkungen werden nicht erwartet bzw. sind mögliche Kapazitätsverluste durch fehlerhaftes kaF mit den verfügbaren Daten nicht darstellbar.			
Parkieren	Shoup (2005)	Literatur	generisch	Näherung des Parkflächenbedarfes auf Basis des Motorisierungsgrades für Nordamerika
	Axhausen (2006)	Literatur	Schweiz	Übertragung der Näherung von Shoup (2005) auf die Schweiz
	Stadt Zürich	Numerischer Datensatz	Stadt Zürich	Daten von Parkierungsanlagen auf öffentlichem Gut in der Stadt Zürich
	STATENT	Numerischer Datensatz	Schweiz	Privatwirtschaftliche Parkhäuser und -anlagen
	Gemeindeportrait	Numerischer Datensatz	Kanton Zürich	Motorfahrzeugbestand der Gebietstypen und Regionen des RZU-Gebiets
Funktionen und Betriebe	STATENT	Numerischer Datensatz	Schweiz	Daten zu Firmenstandorten in NOGA-Kategorien
	GWR	Geodatensatz	Schweiz	Gebäude- und Wohnungsregister

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Datenqualitäten wurde das weitere Vorgehen mittels einer Näherung geleistet. Auf Basis der Daten des STATENT konnten assoziierte Funktionen des Pkw über das gesamte RZU-Gebiet in gleichbleibender Qualität ausfindig gemacht werden. Für die Agglomeration Wien/Niederösterreich haben Mitteregger & Soteropoulos (2021) gezeigt, dass, obwohl diese Funktionen dispers im Raum verteilt sind, sich dennoch Cluster dieser assoziierten Funktionen bilden. Dies ist naheliegend: bei Funktionen, die wesentlicher Bestandteil der Automobilität sind, werden entsprechende viele Parkplatzflächen vorgehalten bzw. sind diese in Lagen entstanden, wo eine hohe Flächenverfügbarkeit die entstehenden großen Platzbedarfe zugelassen hat. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch für die Stadt Zürich, wo Daten sowohl für die Parkierungsflächen wie auch die assoziierten Funktionen verfügbar waren. Die gut identifizierbaren Flächen der Pkw-assozierten Betriebe werden folglich als Index verwendet, der auf ein vermehrtes Auftreten von Parkierungsanlagen verweist.



Abb. 48 Schematische Übersicht über die Kategorien Pkw-assoziierter Flächen

5.3.1 Pkw-assozierte Flächen

Um über das Parkieren hinaus auch Aussagen über potenzielle Transformationsflächen auf Seite der Funktionen und Betriebe treffen zu können, wurden für das gesamte RZU-Gebiet die Pkw-assozierten Betriebe und deren Bestandsflächen ermittelt. Diese werden in Folge nach Merkmalen wie Lage, Art, Flächeninanspruchnahme sowie räumliche Charakteristika analysiert und in Verbindung gesetzt. Ziel ist es, nicht die reine Quantifizierung von Flächen, sondern ebenfalls deren qualitative Merkmale zu diskutieren. Methodische Grundlage bildet hierfür ein ArcGIS-Pro Modell.

Methodik der GIS-Analyse

Ausgehend von den STATENT-Daten (vgl. Tab. 25) werden mit Hilfe der NOGA-Kategorien die Pkw-assozierten Betriebe in den Kategorien „Produktion und Handel“, „Betrieb“, „Wartung“ und „Recycling“ (vgl. Tab. 26) identifiziert und gefiltert.

Tab. 26 NOGA-Kategorien

NOGA	NOGA Bezeichnung	Kategorie
291000	Herstellung von Automobilen und Automotoren	Produktion und Handel
292000	Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern	Produktion und Handel
293100	Herstellung elektrischer und elektronischer Ausrüstungsgegenstände für Automobile	Produktion und Handel
293200	Herstellung von sonstigen Teilen und sonstigem Zubehör für Automobile	Produktion und Handel
451101	Handelsvermittlung und Grosshandel mit Automobilen mit einem Gesamtgewicht von 3,5 t oder weniger	Produktion und Handel
451102	Detailhandel mit Automobilen mit einem Gesamtgewicht von 3,5 t oder weniger	Produktion und Handel
452001	Instandhaltung und Reparatur von Automobilen	Wartung
452002	Reparatur und Lackieren von Karosserien	Wartung

453100	Grosshandel mit Automobilteilen und -zubehör	Wartung
453200	Detailhandel mit Automobilteilen und -zubehör	Wartung
467701	Grosshandel mit Ersatzautoteile, Autoverwertung	Recycling
473000	Detailhandel mit Motorenkraftstoffen (Tankstellen)	Betrieb
493200	Betrieb von Taxis	Betrieb
771100	Vermietung von Automobilen mit einem Gesamtgewicht von 3,5 t oder weniger	Betrieb
855300	Fahr- und Flugschulen	Betrieb

Die Punktdaten dieser Betriebe werden in einem nächsten Schritt mit den Gebäudegrundflächen aus dem Datensatz des Eidgenössischen Gebäude- und Wohnungsregister räumlich verschnitten. Dieser enthält Informationen zu zahlreichen gebäudebezogenen Attributen wie Gebäudekategorien oder Grundflächen, Anzahl der Geschosse, Wohnungsgrössen etc. – wobei einige Informationen nicht vollständig vorhanden sind.

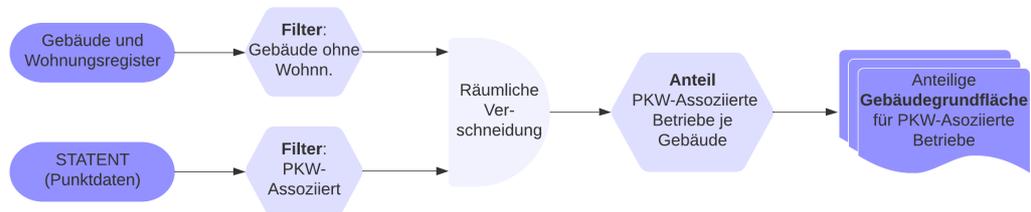


Abb. 49 GIS-Workflow der Ermittlung der PKW-assozierten Betriebsflächen (Gebäudegrundflächen)

Der Gebäude- und Wohnungsregister wurde um Gebäude in der Kategorie „Gebäude mit ausschliesslicher Wohnnutzung“ des Gebäude- und Wohnregisters bereinigt (GKAT <> 1020). Ebenso wurden Sonderbauten nicht weiter berücksichtigt (GKAT <> 1080). Übrig bleiben folgende Kategorien an Gebäuden:

Tab. 27 Im Rahmen der Analyse verwendete Gebäudekategorien (Quelle: Dokumentation GWR, Bundesamt für Statistik)

Bezeichnung	Beschreibung	Beinhaltet (Beispiele)
Andere Wohngebäude (GKAT 1030)	Wohngebäude mit Nebennutzung bestehen mehrheitlich aus Wohnungen, enthalten aber auch industrielle, gewerbliche, kommerzielle oder landwirtschaftliche Räumlichkeiten.	Wohngebäude mit Wohnungen und z.B. einem Geschäft, einer Werkstatt oder einer Bank im Erdgeschoss. Wohngebäude mit Wohnungen und Arztpraxen oder Büroräumlichkeiten im Gebäude. z.B. landwirtschaftliche Betriebsgebäude mit Wohnteil, Ferienhäuser mit Sportgeschäft im Erdgeschoss.
Gebäude mit teilweiser Wohnnutzung (GKAT 1040)	Gebäude mit teilweiser Wohnnutzung enthalten Wohnungen, bestehen aber mehrheitlich aus industriellen, gewerblichen, kommerziellen oder landwirtschaftlichen Räumlichkeiten.	Schulhäuser, Fabriken, Verwaltungsgebäude usw. mit einer Abwärtswohnung o.dgl.
Gebäude ohne Wohnnutzung	Gebäude ohne Wohnnutzung umfassen ausschliesslich Räumlichkeiten ohne Wohnnutzung wie industrielle, gewerbliche, kommerzielle oder landwirtschaftliche Räumlichkeiten.	Schul-, Kultur-, Industrie-, Lager-, Büro- oder Verwaltungsgebäude, Kirchen, Sporthallen, landwirtschaftliche Betriebsgebäude, Nebenbauten wie Garagen, Kleintierställe, Bienenhäuser usw.

In weiterer Folge wurden die Daten des Gebäude- und Wohnungsregisters mit den Betriebsinformationen aus dem STATENT im Zuge einer räumlichen Verschneidung zusammengeführt. Da der Fall auftreten kann, dass mehrere Betriebe ihren Standort in dem gleichen Gebäude haben, musste für jeden Betrieb ein Flächenanteil geschätzt werden. Diese Annäherung wurde über die im STATENT verfügbare Zahl der Beschäftigten durchgeführt. Dazu wurde je Gebäude sowohl die Summe aller Beschäftigten als auch die Summe der PKW-assozierten Betriebe berechnet und anschliessend je Gebäude ein Anteil abgeleitet. Dieser Anteil wurde in weiterer Folge dazu verwendet, die Gebäudegrundfläche entweder gesamt, anteilig oder gar nicht als PKW-assoziert zu deklarieren. Die Gebäudegrundfläche wurde ebenfalls aus dem GWR bezogen – Attribut «Gebäudefläche».

Tab. 28 berücksichtigte Flächenmerkmale aus dem GWR

Flächenmerkmal	In Analyse berücksichtigt
Gebäudegrundfläche	Ja, Annäherung
Geschossfläche	Nein, Betriebsgrössen nicht abschätzbar.
Grundstücksfläche	Nein, (Geo-)Datenverschneidung mit hohem Fehlerpotenzial
Betriebsfläche	Nein, nicht verfügbar.

Die Berechnung der (anteiligen) Gebäudegrundfläche stellt eine Annäherung an den Flächenverbrauch Pkw-assoziierter Betriebe dar. Es werden aus unterschiedlichen (in Tab. 28 ersichtlichen) Gründen keine Geschossflächen, Grundstücksflächen oder Betriebsflächen verwendet.

5.4 Ergebnisse

Die räumliche Verteilung der Pkw-assozierten Betriebe lässt im RZU-Gebiet ebenfalls eine räumliche Clusterung erkennen (siehe Abb. 51/Abb. 51, weitere Karten in Anhang II.4). Entlang der Ausfallsachse von Zürich Richtung Nordwesten finden sich nicht nur viele assoziierte Betriebe, sondern auch jene mit den grössten Gebäudegrundflächen.

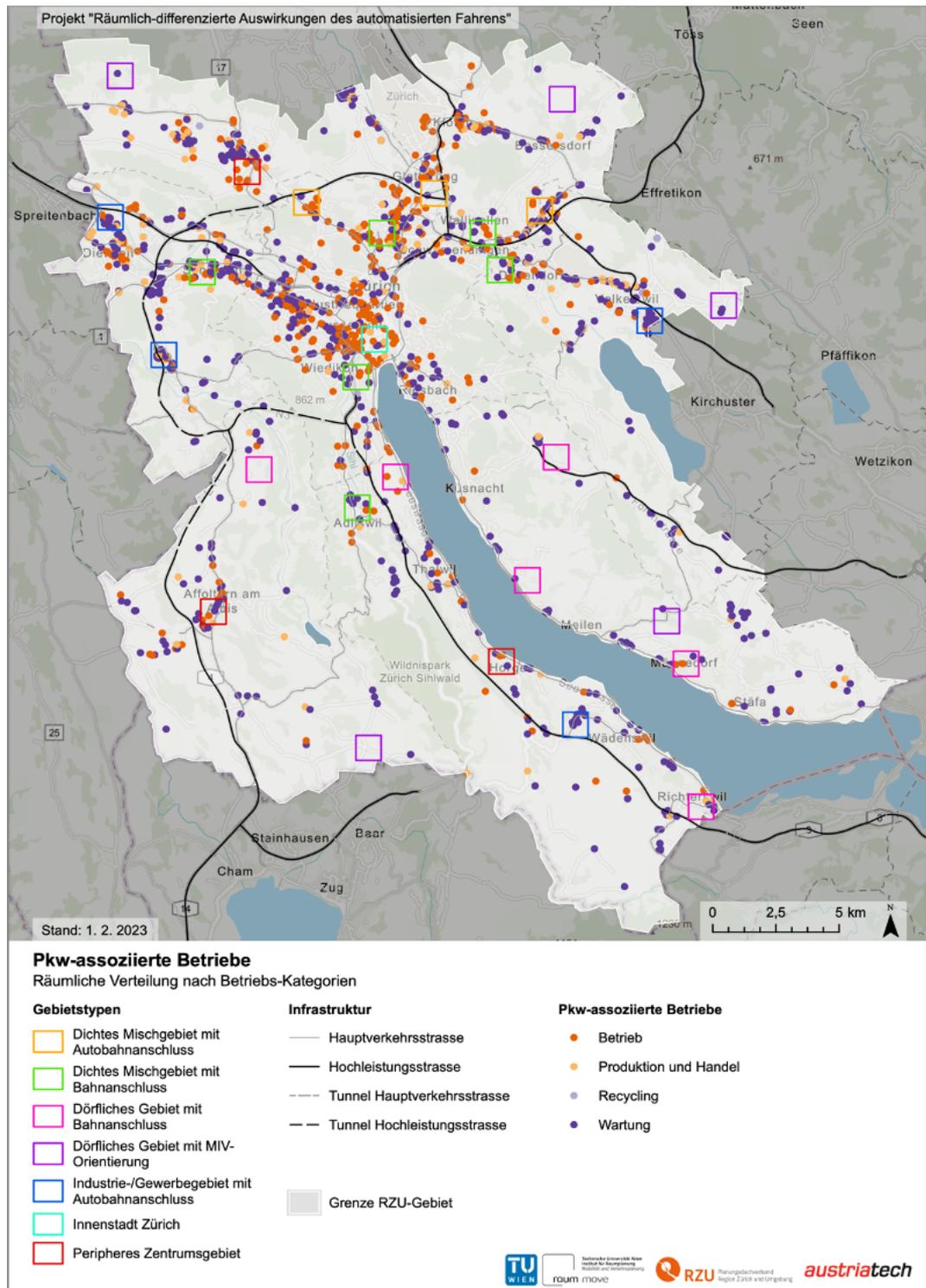


Abb. 50 Räumliche Verteilung der PKW-assozierten Betriebe nach Kategorien, Rechts als Dichtekarte gewichtet mit der Gebäudegrundfläche

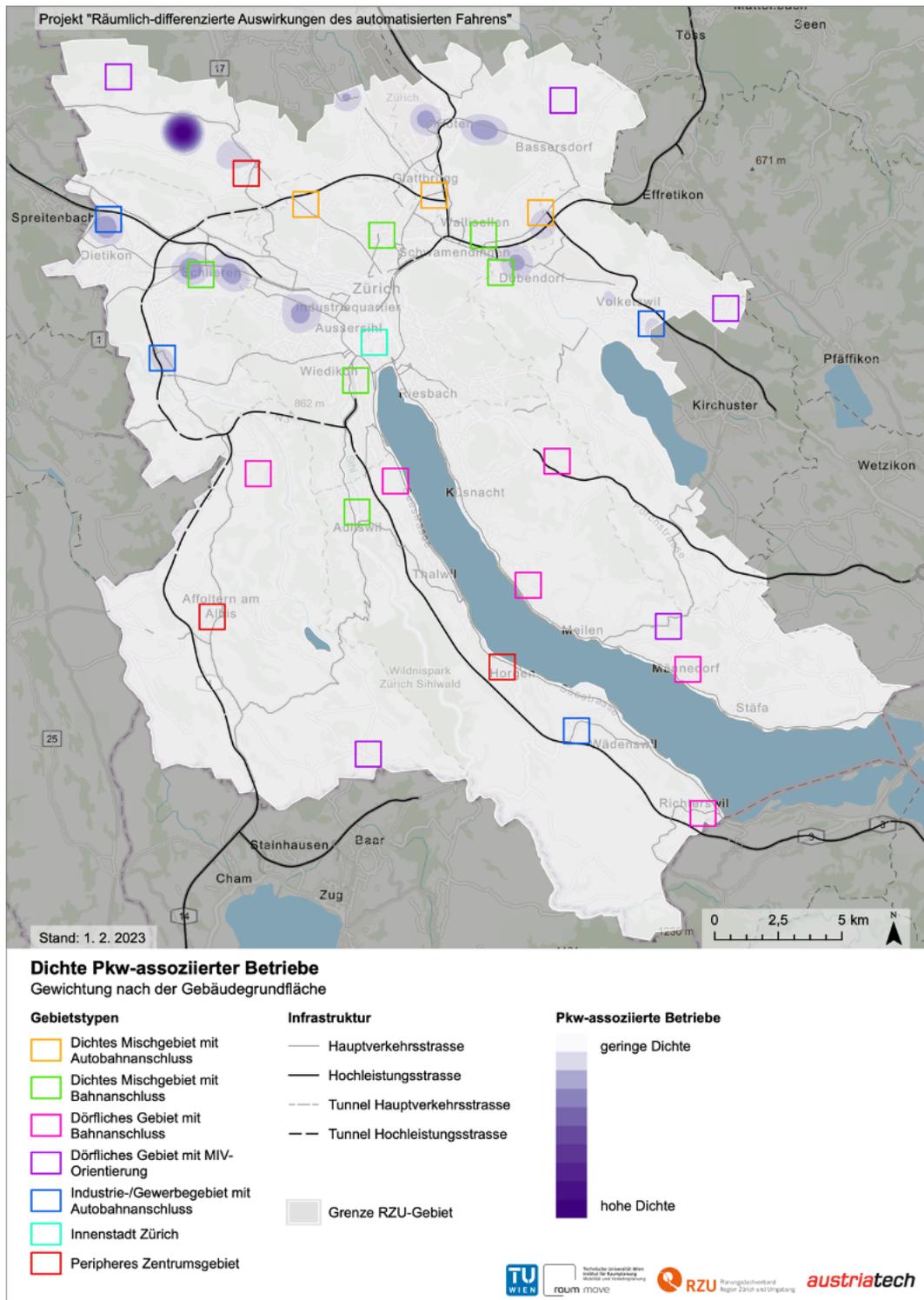


Abb. 51 Räumliche Verteilung der PKW-assozierten Betriebe, Dichtekarte gewichtet mit der Gebäudegrundfläche

5.4.1 Makro-Ebene: Potenzialflächen im RZU-Gebiet

Für das Parken wird auf die Näherung von Axhausen (2006) zurückgegriffen, der davon ausgeht, dass in der Schweiz rund drei Parkplätze auf öffentlichem sowie privatem Grund für jeden Pkw zur Verfügung stehen. Diese Schätzung wird von jüngeren Erhebungen geschützt, die für das Parken auf privatem Grund und am Arbeitsplatz vorliegen. Tchervenkov (2022: 86) berichtet, dass in der Schweiz etwa 77 % der Haushalte mindestens einen Parkplatz am Wohnstandort haben und 75 % der erwerbstätigen

Bevölkerung einen weiteren Parkplatz am Arbeitsplatz nutzen können. Bezugnehmend auf die Schätzung von Axhausen würde das bedeuten, dass nur etwa ein weiterer Parkplatz zusätzlich im öffentlichen Raum oder anderswo vorgehalten werden müsste.

Für das Fallbeispiel des RZU-Gebietes und unter Berücksichtigung das aktuell auf regionaler (und Gemeinde-) Ebene verfügbaren Personenwagenzahlen (Tab. 23) gehen wir von einem Fahrzeugbestand von aktuell 458'800 Fahrzeugen aus. Das würde bedeuten, dass ohne Zu- und Abfahrten eine Fläche von rund 5,5 km² für den ruhenden Verkehr vorgehalten wird.

Gebäudegrundfläche (anteilig) PKW-assoziierter Betriebe und Parkplatzflächen

im Vergleich

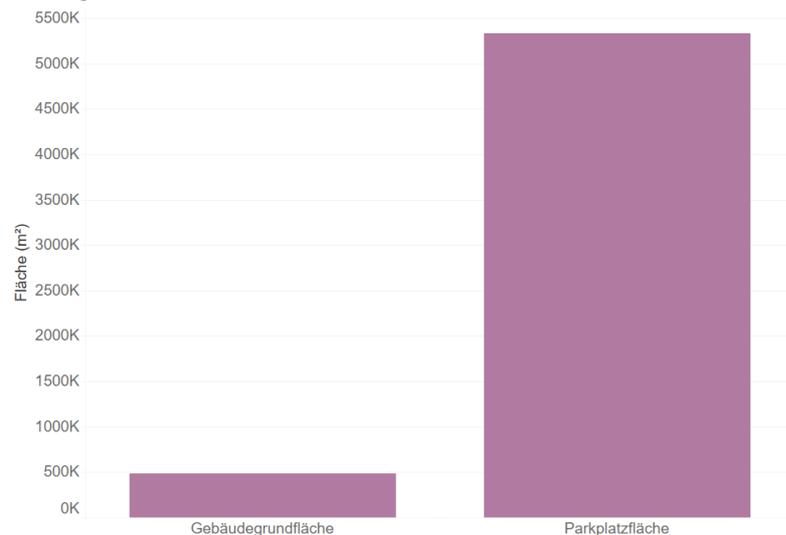


Abb. 52 Vergleichende Flächeninanspruchnahme von Parkieranlagen und Pkw-assozierte Betriebe

Für das gesamte RZU-Gebiet wurde eine anteilige Gebäudegrundfläche (die an den jeweiligen Betrieben vorhandenen Parkieranlagen und anderen Nutzungen am gleichen Grund sind in der Analyse ausgenommen) von 0,48 km² ermittelt. Die erhobenen Werte zu der Flächeninanspruchnahme der Pkw-assozierten Funktionen und der Schätzung der gesamten Parkieranlagen stehen somit in einem Verhältnis von in etwa 1:10 (Abb. 52). Vergleicht man den Wert der Pkw-assozierten Betriebe mit jenen von grossen Stadtentwicklungsgebieten der Region, so zeigt sich deren Bedeutung. Die Restrukturierung des Bahnareals entlang der Europaallee umfasst 0,08 km²; die Stadtentwicklung Bahnhof Nord (Regensdorf) etwa 0,21 km². Diese Fläche entspricht 12.5 % der Siedlungsfläche der Stadt Zürich. Bei diesem gezogenen Vergleich ist zu beachten, dass hier die Gebäudegrundfläche mit der Arealfläche verglichen wird, d.h. dass die tatsächlichen Flächenpotenziale um einiges größer anzunehmen sind.

Über das gesamte RZU-Gebiet zeigt sich, dass diese Flächen vermehrt an vielbefahrenen Einfallstrassen zu finden sind (Seestrasse am westlichen Seeufer, Zürcher- bzw. Badenerstrasse im Nordwesten und die Überlandstrasse im Nordosten der Stadt Zürich).

Stellt man das Erreichbarkeitspotenzial gemeinsam mit den Pkw-assozierten Flächen dar (folgende Abb. 53), wird offensichtlich, dass im Stadtgürtel ein besonders hohes Erreichbarkeitspotenzial auf besonders viele Pkw-assozierten Flächen trifft. Die Agglomeration /der urbane Gürtel kann sich so langfristig zu einem dynamischen Entwicklungsraum entwickeln. Periphere Lagen, wo diese relative Schnittmenge auch hoch ist, sind von der Summe der verfügbaren Flächen und der Personen im Fallbeispiel eher unbedeutend, stehen aber in deutlichem Konflikt zu bestehenden planerischen Zielsetzungen. Es ist zu beachten, dass in der bivariaten Karte relationale Grössen dargestellt werden.

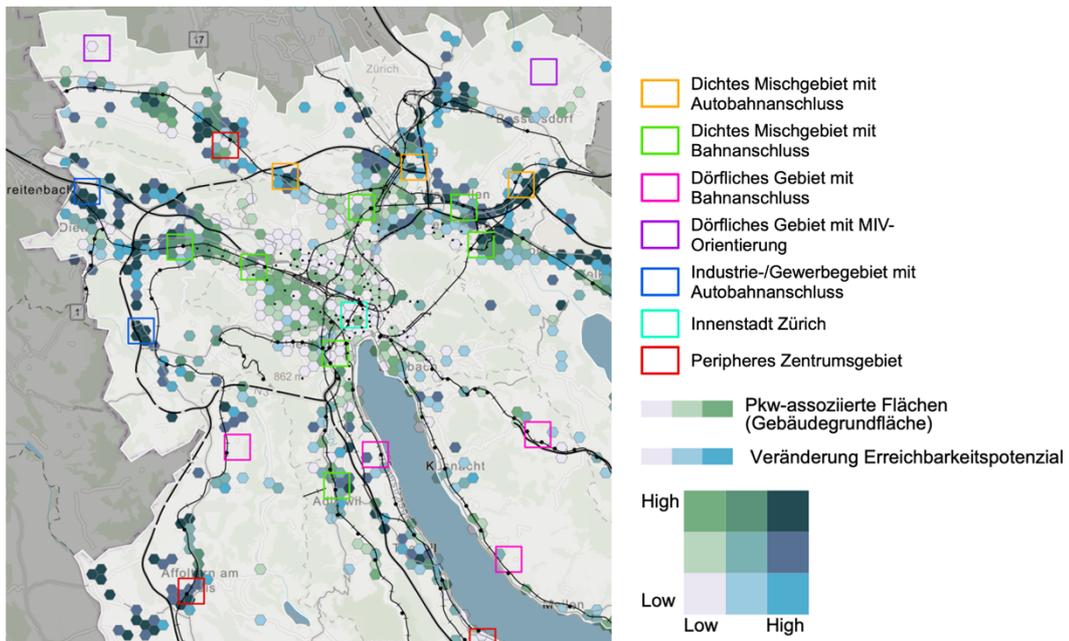


Abb. 53 bivariate Karte Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials und Gebäudegrundfläche Pkw-assozierte Gebäude, Variante «kaF letzte Meile mit Autobahn»

5.4.2 Meso-Ebene: Verteilung der Potenzialflächen in den Gebietstypen

Die Betrachtung der Gebietstypen zeigt eine unterschiedliche Verteilung der Potenzialflächen. Die grössten Mengen befinden sich in den Gebietstypen «Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss», «Dichtes Mischgebiet mit Bahnanschluss» und «Dichtes Mischgebiet mit Autobahnanschluss». Die Innenstadt Zürich liegt deutlich dahinter, aber noch vor den dörflichen Gebietstypen, in denen die geringsten Flächenpotenziale zu finden sind. Die fünf Gebiete, die jeweils deutlich über dem Durchschnitt liegen, Dietlikon, Hochbord/Stettbach, Schlieren, Dietikon/Silbern und Regensdorf liegen jeweils im Stadtgürtel und in der Nähe von Autobahnkreuzungen und Bahnstrecken.

Gebäudegrundfläche (anteilig) PKW-assoziierter Betriebe nach Gebietstypen

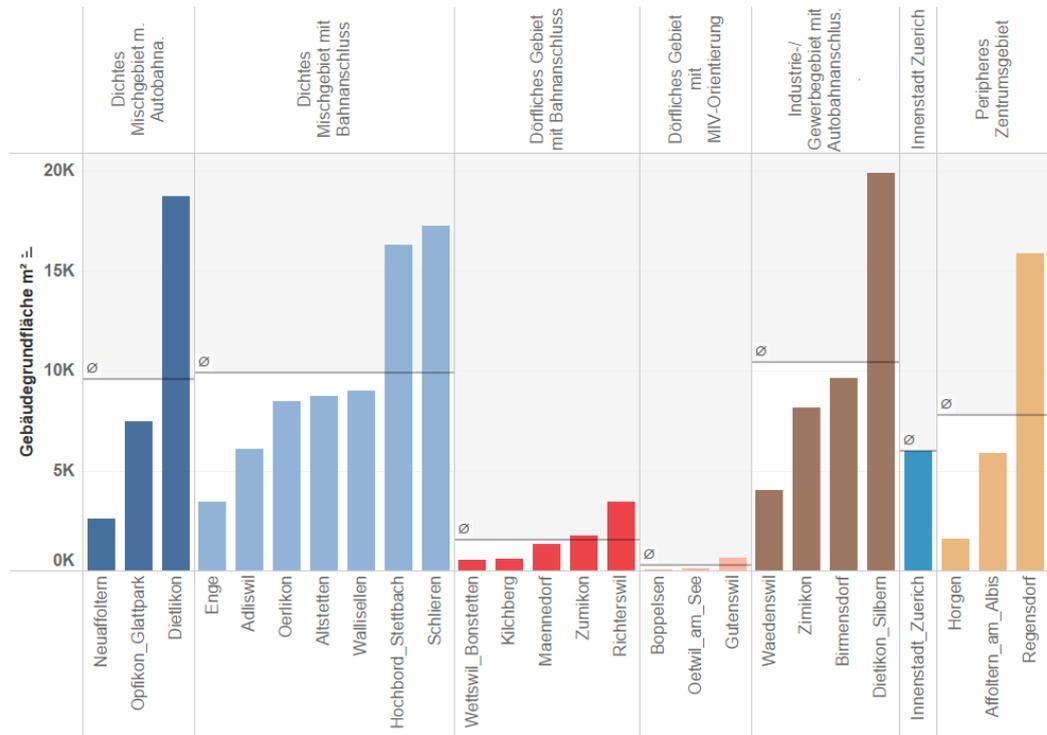


Abb. 54 Vergleichende Flächeninanspruchnahme von Parkierungsanlagen und Pkw-assozierte Betriebe

In dieser Massstabebene wurde die Schätzung von Axhausen bezüglich des Parkflächenbedarfs je Pkw vermindert. Da in den hier betrachteten Gebietstypen viele mögliche Ziele (z.B. Freizeiteinrichtungen) nicht vorkommen, wird angenommen, dass nur Parkplätze für jeden Pkw vorgehalten werden. Der Vergleich der Näherung der Parkplatzflächen mit der Flächeninanspruchnahme der Pkw-assozierten Betriebe zeigt einen Zusammenhang zwischen den beiden Flächentypen (Abb. 55). Die Gebietstypen «Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss», wo im Verhältnis ein deutlich höherer Anteil von Pkw-assozierten Flächen zu finden ist, und die «Innenstadt Zürich», wo es Parkierungsanlagen anteilmässig deutlich stärker sind, entsprechen nicht diesem Schema, wirken allerdings im Bezug zum oben beschriebenen Zusammenhang nachvollziehbar.

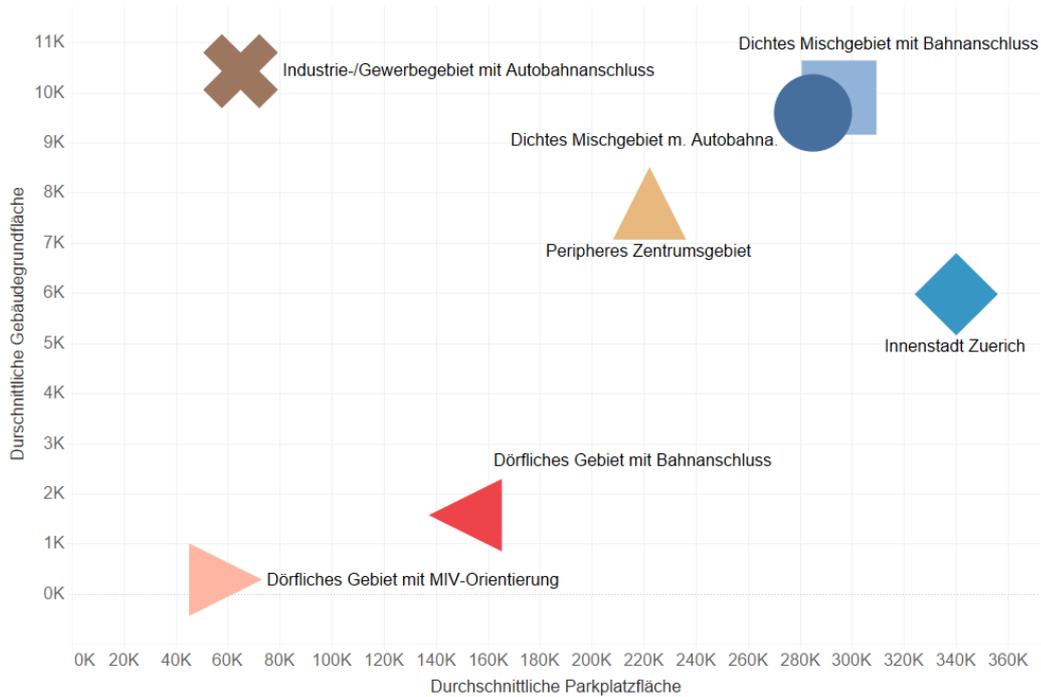


Abb. 55 Gegenüberstellung Flächen Pkw-assoziierter Betriebe (Y-Achse) und Parkplatzflächen (X-Achse) in den Gebietstypen

5.4.3 Mikro-Ebene: Gegenüberstellung von Flächenpotenzialen in möglichen aF-Betriebsgebieten

Für die weitere Untersuchung wurden zwei mögliche aF-Betriebsgebiete im Nordwesten des RZU-Gebietes gewählt, in denen die Veränderung der Erreichbarkeit durch beide Anwendungsfälle des kaF hoch ist und auch viele Einwohnende vor Ort davon potenziell profitieren. Diese Auswahl lässt zu, dass über die Grösse und Einwohnerzahl im jeweils versorgten Areal auch eine Abschätzung einer Flotte möglich wird und der dafür notwendige Platzbedarf genähert werden kann.

Für die Angebotsform „automatisiertes Fahren auf der letzten Meile“ wird als aF-Betriebsgebiet ein Band westlich von Schlieren betrachtet. Bei der darauf aufbauenden Betrachtung inklusive der zweiten Angebotsform „automatisiertes Fahren auf der Autobahn“ erweitert sich dieses deutlich, sodass weitere drei Gebietstypen Dietlikon/Silbern (Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss), Regendorf (Peripheres Zentrumsgebiet) und Urdorf (Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss) erfasst sind. Abb. 56 zeigt die beiden potenziellen aF-Betriebsgebiete.

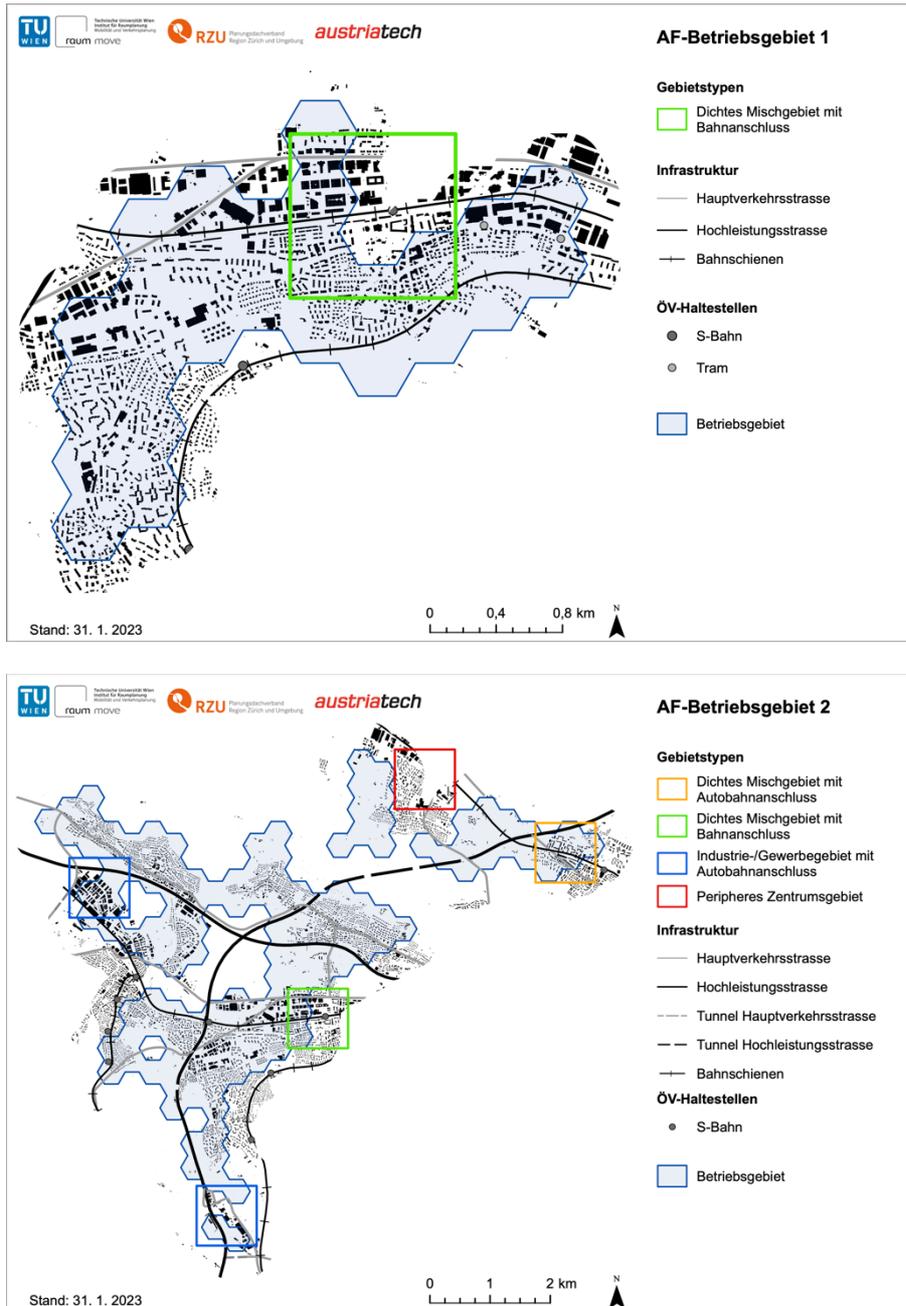


Abb. 56 aF-Betriebsgebiet 1 (oben) westlich des Zentrums von Schlieren und aF-Betriebsgebiet 2, das sich über die Gebietstypen Schlieren, Dietikon-Silbernen, Regensdorf, Urdorf erstreckt (unten)

Die grosse Veränderung der Fläche von Betriebsgebiet 1 zu Betriebsgebiet 2 ist darauf zurückzuführen, dass sich hier die Autobahnen A1, A3 und A4 im Betrachtungsraum kreuzen und entsprechend hohe Erreichbarkeitsgewinne durch die zusätzliche Angebotsform kaF-Autobahn abgebildet werden.

Das erste aF-Betriebsgebiet (Angebotsform automatisiertes Fahren auf der letzten Meile) hat etwa 20% der Fläche des zweiten aF-Betriebsgebietes. Die Bevölkerungsdichte ist allerdings deutlich höher. Etwa 40% der Einwohner des aF-Betriebsgebietes 2 sind bereits vom aF-Betriebsgebiet 1 erfasst (Tab. 29). Der Motorfahrzeugbestand wurde auf Basis der auf Gemeindeebene vorliegenden Daten genähert.

Tab. 29 Eigenschaften der betrachteten aF-Betriebsgebiete

	aF-Betriebsgebiet 1	aF-Betriebsgebiet 2	Methode
Grösse (km²)	3,6	18,2	Berechnung
Einwohner	23'987	59'491	Berechnung
Motorfahrzeugbestand	11'850	32'700	Daten verfügbar
Parkplatzflächen (m²) Annahme Parkplätze / Pkw			
2	280'000	800'000	Annahme
2,5	370'000	1'000'000	
3	444'000	1'200'000	
Grundfläche Pkw- assoziierter Betriebe (m²)	16'300	52'000	Berechnung GIS-Analyse
Annahmen kaF auf Basis Tab 27 und Tab 28			
Flotte kaF	250-300	800-1000	Annahme (Basis: Simulationsstudien aus Literatur)
Halteflächenbedarf (m²)	1'100	3'600	Annahme
Depots (m²)	5'000	16'000	Annahme

Diese Strukturdaten wurden verwendet, um eine erste Näherung einer möglichen Flottengrösse abzuschätzen. Diese Näherung wurde auf Basis der Literatur bzw. vergleichbaren Simulationsstudien durchgeführt (Fagnat & Kockelman 2016, Hörl et al. 2019, Winter et al. 2021). Winter et al. 2021 simulieren eine Flotte von 12'500 kaF für 767'500 Agenten. Fagnat & Kockelman (2016) simulieren 1715 kaF für 16'500 Personen bei einer durchschnittlichen Wartedauer von knapp unter fünf Minuten. Hörl et al. 2019 schliessen aus einer Simulation für Zürich eine Population von 137'000 Agenten, die mit einer Flotte im Bereich von 7'000 bis 14'000 Fahrzeugen notwendig wäre. Auf Basis dieser Studien wurde für die beiden Betriebsgebiete angenommen, dass ein Fahrzeug (beider kollektiver Angebotsformen) die Nachfrage von 50-65 Personen befriedigen kann.

Für die Grösse der Depots wurde auf Basis von Yi und Smart (2021) wird davon ausgegangen, dass sich maximal 50% der Fahrzeuge gleichzeitig im Depot befinden. Weiters wurde angenommen, dass der Flächenbedarf der Fahrzeuge 30% der Grundfläche des Depots ausmacht und den Rest Zu- und Abfahrten bzw. andere für den Betrieb notwendige Nutzungen ausmachen. Zur Berechnung der Halteflächen wurde angenommen, dass maximal 30% der Fahrzeuge gleichzeitig diese Vorhalteflächen nutzen.

In der Gegenüberstellung mit den Flächenpotenzialen zeigt sich, dass die zusätzliche Flächeninanspruchnahme nur einen Bruchteil der aktuell vom Pkw beanspruchten Flächen (nicht inkludiert sind die Fahrbahnen) ausmacht. Nicht berücksichtigt wurde, dass es durchaus möglich ist, dass mehrere Anbieter in einem aF-Betriebsgebiet in Konkurrenz zueinander agieren. Allerdings ist zu beachten, dass die Flächenbedarfe unmittelbar entstehen, während das Freiwerden von Flächen, sowohl von Parkplätzen als auch von Pkw-assozierten Betrieben, ein verändertes Mobilitätsverhalten voraussetzt und damit verzögert erfolgt. Zudem ist es fraglich, ob selbst bei einem Areal von der Grösse des aF-Betriebsgebiets 2 eine lokale Verhaltensänderung durch die beiden Angebotsformen erzielt werden könnte, die über einzelne Personengruppen hinaus im Gesamtmodalsplit deutlich würde.

Im aF-Betriebsgebiet 1 fällt auf, dass der Bahnhof Schlieren ausserhalb des für den Einsatz von automatisierten Fahrsystemen befahrbaren Bereiches liegt. Aus verkehrlicher Sicht wäre es folglich notwendig, die aF-Befahrbarkeit mit infrastrukturellen Eingriffen zu verbessern, um die Integration ins bestehende ÖV-Netz zu gewährleisten. Dies sollte allerdings unter Rücksichtnahme auf den Fuss- und Veloverkehr und die Aufenthaltsqualität im Strassenraum erfolgen.

Verkehrsdrehscheiben sind in beiden Fällen der Schlüssel dafür, dass das neue Angebot in den bestehenden ÖV integriert werden kann. Auch hier entstehen zusätzliche Flächenbedarfe, die über die von reinen Halteflächen hinausgehen. Vor allem für das zweite Angebot, automatisiertes Fahren auf der Autobahn, wo es sinnvoll ist den Übergang zur S-Bahn herzustellen, wären die dafür benötigten Flächen erheblich (vgl. Abb. 46 «Tor zur Stadt»).

Wie oben beschrieben, tritt die Erreichbarkeitsverbesserung durch die Angebotsform kollektives automatisiertes Fahren auf der Autobahn nur dann ein, wenn Verkehrsdrehscheiben an den Autobahnabfahrten entstehen oder günstig gelegene bestehende genutzt werden können. Die Erreichbarkeitsberechnung unterstellt also, dass an jeder Autobahnabfahrt eine Möglichkeit des Zustiegs gegeben ist. Mit dem Blick auf das Betriebsgebiet 2, sieht man die möglichen Potentiale an der Abfahrt Urdorf Nord. Hier wäre eine Verbindung zur Limmattalbahn (Haltestelle Birmensdorferstrasse) und der S-Bahn (Haltestelle Glanzenberg) denkbar.

Die hier gezeigten Flottengrössen von vierhundert bzw. eintausend Fahrzeugen entsprechen dem, was in der internationalen Gesetzgebung ermöglicht wurde (siehe Kap. 6). Signifikant ist in beiden untersuchten Fällen, dass die höhere aF-Befahrbarkeit von auto-affinen Lagen dazu führt, dass tendenziell Rand- und periphere Lagen stärker von den neuen Angebotsformen profitieren als Zentren. Die damit einhergehende Veränderung der Erreichbarkeit kann zu einer ungewollten Schwächung der Siedlungskerne führen bzw. Mehrverkehr entsteht, wenn Personen gerade über die Autobahn weitere Fahrten zu attraktiven Orten in Kauf nehmen.

5.5 Fazit und Schlussfolgerungen

Die Transformation des Mobilitätssystems die kaF in den untersuchten Anwendungsfällen auslöst, wird auch räumliche Wirkungen konzentriert in ausgewählten Betriebsgebieten entfalten. Die Zusammenschau des internationalen State of the Art zeigt deutlich, dass ähnliche Herausforderungen in der Übergangszeit zu erwarten sind, wie diese unter dem Titel des Mischverkehrs aus verkehrlicher Sicht nachgewiesen wurden. Tendenziell werden Effizienzgewinne und abnehmende Flächenbedarfe in allen räumlichen Dimensionen erst langfristig erwartet, während kurzfristig Flächenbedarfe bestehen.

Für das gesamte RZU-Gebiet konnte gezeigt werden, dass langfristig (mehrere Jahrzehnte) enorme Flächenpotenziale freigesetzt werden könnten. Im Kontext einer Entwicklung des Bestandes, dürften diese Fläche sich als wertvolle Ressource darstellen. Sie sind im Siedlungsraum nicht gleichmäßig verteilt, sondern vermehrt im Agglomerationsgürtel zu finden, meist in der Nähe von Autobahnen gelegen und häufig in guter bis sehr guter ÖV-Gütekategorie.

Der erste Schritt in diese Übergangszeit wird mit der Ausweisung von kaF Betriebsgebieten gesetzt. Hier werden sich nicht nur automatisierte Verkehre (und deren Wirkungen), sondern auch räumliche Effekte konzentrieren. Es entstehen neue Flächenbedarfe, von Halteflächen bis zu Depots, die je größer die Betriebsgebiete werden bzw. die damit verbundene Anzahl der automatisierten Fahrzeuge im Betrieb erheblich sein könnten.

5.5.1 Limitationen und Forschungsbedarf

Nachfolgend werden die Limitationen des Vorgehens und der sich ergebende Forschungsbedarf dargestellt.

- Für die hier vorgestellten Ergebnisse, konnten teilweise nur Schätzungen verwendet werden. Besonders im Fall der Abschätzung der Parkplatzflächen sollte daher die Datenlage dringend verbessert werden. Dies vor allem auch, weil diese Flächen nicht alleine von einer Transformation im Kontext der Automatisierung betroffen wären, sondern auch im Zuge einer Mobilitätswende zur Debatte stehen. Die Potenziale dieser Flächen sind enorm.
- Um die Grösse der Flotten abzuschätzen, wurde auf die Annahmen anderer Studien zurückgegriffen. Es bedarf eigenständiger Nachfragemodellierungen, damit die Zahl der Fahrzeuge und deren Platzbedarfe besser abgeschätzt werden können.
- Die Flächeninanspruchnahme von intermodalen Knoten für kaF muss weiter beforscht werden. Es wurde gezeigt, dass diese in Grösse und Ausstattung variieren und darüber hinaus im Anwendungsfall automatisiertes Fahren auf der Autobahn eine Voraussetzung für dieses Angebot sind – nicht nur in einem Standort, sondern über ein Netz möglicher Verbindungen und deren Schnittstellen zum bestehenden (hochrangigen) ÖV.
- Auch die vorgestellten Ergebnisse zum Flächenbedarf PKW-assoziierter Betriebe konnte nur durch eine Abschätzung erfolgen. Die Zuordnung von exakt verorteten Adressdaten zu Gebäuden war herausfordernd und nur über eine Annäherung möglich. Die Ableitung des tatsächlichen Flächenbedarfs beruht auf einer Schätzung auf Basis der Beschäftigtenzahlen. Um diese Abschätzung zu präzisieren wäre eine eigene Erhebung notwendig.
- Das Ergebnis der Gebäudegrundflächen der PKW-assozierten Betriebe berücksichtigt keine Nachbarschaftsanalyse – insofern konnten auch grössere zusammenhängende räumliche Cluster nur über visuelle Zugänge identifiziert werden. Für die Identifikation tatsächlicher Potenzialflächen für Nachverdichtung oder Stadtentwicklung müssten zuerst zusammenhängende Flächen abgeleitet werden.
- Die Auswahl der PKW-assozierten Betriebe anhand der STATENT-Daten stellt ebenso eine Annäherung dar. Es wurden alle PKW-assozierten NOGA-Kategorien identifiziert und danach alle Betriebe in diesen Kategorien für die Analyse genutzt. Eine Einschätzung hinsichtlich des Fortbestands des Unternehmens nach einer grossräumigen Transformation der Mobilität mit automatisierten Fahrzeugen wurde nicht vorgenommen.

6 Auswirkungen auf raum- und verkehrsplanerische Zielsetzungen am Fallbeispiel RZU-Gebiet

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analysen für das Fallbeispiel des RZU-Gebietes zu aF-Befahrbarkeit, Erreichbarkeit und dem zukünftigen Flächenbedarf (vgl. vorherige Kapitel) den verkehrs- und raumplanerischen Zielsetzungen (vgl. Tab 4 in Kap. 2.2) gegenübergestellt. Die Zielsetzungen von der Bundes- bis auf die kommunale Ebene weisen eine hohe Kohärenz auf, weshalb der Fokus auf die räumlich konkreten kantonalen Vorgaben gelegt und nur in Einzelfällen auf die Bundesebene verwiesen wird. Letztere wird einerseits qualitativ berücksichtigt und, wo möglich, durch mit Karten illustriert. Für die heutigen und geplanten Bevölkerungs- und Beschäftigtendichten können einzelne Aspekte der Zielstellungen auch quantitativ aufbereitet werden. Ausgehend von der Gegenüberstellung der Studienergebnisse mit den bestehenden raum- und verkehrspolitischen Zielsetzungen, werden Chancen und Risiken abgeleitet und anschliessend in Kapitel 7 Handlungsoptionen und Regulierungsbedarfe formuliert.

Die Gliederung nach Betrachtungsebenen wird beibehalten: RZU-Gebiet (Makro), vergleichende Betrachtung der Gebietstypen (Meso) und Wirkungen innerhalb der Gebietstypen (Mikro) (vgl. Abb. 5). Während sich die Ergebnisse klar zuordnen lassen, sind sowohl die Zielsetzungen als auch die Interpretationen auf mehreren Ebenen relevant. Für die folgenden Ausführungen werden hier einzelne Aspekte des Fokus' des Projekts (vgl. Kap. 1.4) in Erinnerung gerufen:

- Betrachtung der Phase des Mischverkehrs (nicht-automatisierte Verkehrsteilnehmende und automatisierte Fahrzeuge bis zum Level 4)
- kollektive Nutzung automatisierter Fahrzeuge (kaF) räumlich differenziert nach Befahrbarkeit des Straßennetzes
- Unterscheidung der Varianten «kaF-letzte Meile ohne Autobahn», «kaF-letzte Meile mit Autobahn»
- keine Betrachtung eines Zeitpunktes oder möglichen Zustandes des Mobilitätssystems, sondern Betrachtung und Bewertung des Ist-Zustandes als Basis für zeitlich naheliegende Entwicklungen

Die nachfolgenden Ausführungen wurden an einem Workshop mit verschiedenen Stakeholdern aus dem Bereich Raum- und Verkehrsplanung am 9. September 2022 diskutiert bzw. entwickelt. Dabei waren Vertreter vom Kanton und der Stadt Zürich sowie von Planungsregionen im RZU-Gebiet anwesend, die bereits die Validierung der Gebietstypen begleitet haben.

6.1 Ebene RZU-Gebiet (Makro)

6.1.1 Interpretation der Ergebnisse

aF-Befahrbarkeit

Im RZU-Gebiet ist nach den Ergebnissen zur aF-Befahrbarkeitsanalyse (vgl. Kap. 3.3) zumindest in naher Zukunft nicht mit einem ubiquitären Einsatz von automatisierten Fahrzeugen zu rechnen. Zusammenhängende Gebiete mit hoher aF-Befahrbarkeit (Level 4-Inseln) sind gehäuft im Gürtel der Agglomeration zu finden. Im Allgemeinen sind dies Siedlungsstrukturen, die bereits unter dem Paradigma der Automobilität geplant oder entstanden sind. Zudem stechen alle Autobahnen hervor, die sich, aus technologischer Sicht, besonders für den Einsatz von automatisierten Fahrsystemen eignen. Gebiete mit einer eher schlechten aF-Befahrbarkeit sind vor allem die Kernstadt Zürich und andere

Zentren im Gebiet, in denen Strassenräume weniger für den fließenden motorisierten Verkehr, sondern stärker nach für den Aufenthalt sowie Fuss- und Veloverkehr gestaltet werden, zu finden. Der Einsatz von automatisierten Fahrzeugen in naher Zukunft wäre hier nur denkbar, wenn grössere infrastrukturelle Anpassungen im Straßenraum vorgenommen oder eine Reduktion der Geschwindigkeit für automatisierte und/oder alle Fahrzeuge durchgesetzt würde.

Erreichbarkeitsveränderung

Auf Basis der aF-Befahrbarkeit wurde eine Erreichbarkeitsanalyse durchgeführt. Hierzu wurden zwei Angebotsformen von kaF gebildet und in zwei unterschiedlichen Varianten berechnet: erstens, ein neues Angebot mit kaF auf der letzten Meile (Variante 1) und zweitens zusätzlich ein weiteres Angebot mit kaF auf Autobahnen (Variante 2) (vgl. Abb. 6Abb. 7). Ausgehend von der Analyse der Befahrbarkeit, bildet jene der Erreichbarkeit eine noch kleinere Teilmenge: In den Vordergrund treten jene Teilbereiche der Siedlungsstruktur, in denen es nicht nur aus technologischer Sicht möglich ist ein automatisiertes Level 4-Fahrzeug zu betreiben, sondern wo sich gegenüber der bestehenden ÖV-Versorgung eine relevante Verbesserung des Angebots nachweisen lässt.

Mit Blick auf das gesamte RZU-Gebiet zeigen sich in der Variante 1 Verbesserungen der Erreichbarkeit vor allem ausserhalb kleinerer Zentren im Agglomerationsgürtel und ebenfalls ausgeprägt an den beiden Ufern des Zürichsees (vgl. Kap. 4.3, Abb. 37Abb. 38). In beiden Fällen kann diese Angebotsform dazu beitragen, die gute bestehende Versorgung durch das Schienennetz tiefer in den Raum zu bringen. Die Differenzierung, die durch die aF-Befahrbarkeitsanalyse erreicht wurde, zeigt sich hier, weil dichte, belebte Siedlungsbänder von dieser Verbesserung der Erreichbarkeit kaum profitieren können.

In der Variante 2 «kaF-letzte Meile mit Autobahn» verlagern sich die Erreichbarkeitsgewinne tendenziell auf Gebiete noch weiter entfernt von den Zentren, zugunsten von Lagen an Autobahnauf- und -abfahrten. Bemerkenswert ist auch das abweichende Bild an den Seeufern: das linke Seeufer am Zimmerberg profitiert hier stärker, da es über die Autobahn A3 erschlossen wird. In einigen Teilen des RZU-Gebiets zeigt die Analyse keine Erreichbarkeitsverbesserungen durch kaF, insbesondere in der Innenstadt von Zürich, jedoch auch in weiteren Zentren und urbanen Räumen wie Dübendorf, Affoltern a.A. (profitiert erst mit Nutzung der Autobahn) oder Regensdorf. Dies liegt zum einen in der bestehenden hochqualitativen ÖV-Versorgung begründet und zum anderen in der relativ schlechten Befahrbarkeit innerstädtischer Lagen.

Die Ergebnisse der Erreichbarkeitsanalyse basieren auf dem befahrbaren Strassennetz und heben damit auch Orte hervor, wo Strassen existieren, allerdings geringere Nutzungen vorhanden sind (vgl. Abb. 59). Dies ist zum Beispiel am südwestlichen Rand des RZU-Gebietes Richtung Zug der Fall. Um dieser augenscheinlichen Schwäche (der Darstellung ebenso wie der Analyse) zu begegnen, wurde ermittelt, wo möglichst viele Einwohnende von diesen Erreichbarkeitsgewinnen profitieren könnten. Diese noch einmal kleineren Bereiche (siehe folgende Ausführungen), werden als vielversprechende Kandidaten für aF-Betriebsgebiete (Bereiche mit automatisiertem Fahren Level 4) gesehen, da hier potenziell besonders viele Menschen von einer deutlichen Verbesserung gegenüber der aktuellen ÖV-Versorgung profitieren würden.

Veränderte Flächenbedarfe

Neben verkehrlichen Wirkungen werden im Kontext des kaF auch räumliche Effekte erwartet. Der internationale Forschungsstand zeigt hier eine Ungleichzeitigkeit von neuen Flächenbedarfen und freiwerdenden Flächen. Es konnte gezeigt werden, dass für kaF-Betriebsgebiete kurzfristig zusätzlich moderate Platzbedarfe für Infrastrukturen (Parkplatz- bzw. Vorhalteflächen, Pick-up und drop-off Zonen, Depots) entstehen, die für den Betrieb der Angebote notwendig sind. Für die Angebotsform kaF-Autobahn ist von einem punktuell erheblichen Platzbedarf auszugehen, weil an Autobahnabfahrten Anschlussstellen im Sinne von Verkehrsdrehscheiben entstehen bzw. angepasst werden müssten, die das neue Angebot in das bestehende ÖV-Angebot integrieren.

Langfristig (im Sinne von mehreren Jahrzehnten) konnte gezeigt werden, dass erhebliche Flächenpotenziale durch den Wandel des Mobilitätssystems realisiert werden könnten. In einer ersten Näherung gehen wir davon aus, dass in Summe etwa 6 km² des Siedlungsraumes dem Pkw zuordenbar sind. Diese Flächen sind zum größten Teil Parkieranlagen und rund 1/10 weitere Pkw-assoziierte Funktionen, wie etwa Waschanalgen, Tankstellen oder Autohäuser. Als Vergleich: Diese Fläche entspricht 12.5 % der Siedlungsfläche der Stadt Zürich.

6.1.2 Abgleich mit raumplanerischen Zielsetzungen

Für die grossmassstäbliche Entwicklung des Kantons Zürich ist das Raumordnungskonzept im kantonalen Richtplan (vgl. Kap. 2.2) massgebend. Hierin werden beispielsweise Räume festgelegt, in denen das Gros des Bevölkerungswachstums aufgenommen werden soll (Handlungsraum «Stadtlandschaft» und «urbane Wohnlandschaft»). Vom kantonalen Richtplan ausgehend werden Vorgaben für die Erreichbarkeitsplanung getroffen, die zwischen ÖV- und MIV-Erreichbarkeit differenzieren. Ausserhalb der «Stadtlandschaft» und «urbanen Wohnlandschaft» soll die ÖV-Erreichbarkeit nur erhalten und nicht verbessert werden, um die Siedlungsentwicklung hier nicht zusätzlich zu fördern.

Abb. 57 zeigt die Überlagerung der Verbesserung der Erreichbarkeit (Variante «kaF auf der letzten Meile ohne Autobahn») mit der räumlichen Zuordnung dieser Handlungsräume. Die Erreichbarkeitsverbesserungen finden sich mehrheitlich in den Handlungsräumen «Stadtlandschaft» (braun) und «urbane Wohnlandschaft» (orange), teilweise jedoch auch im Handlungsraum «Landschaft unter Druck» (gelb) für den weder ein Bevölkerungswachstum noch eine Verbesserung der Erreichbarkeit als Ziel benannt wird.

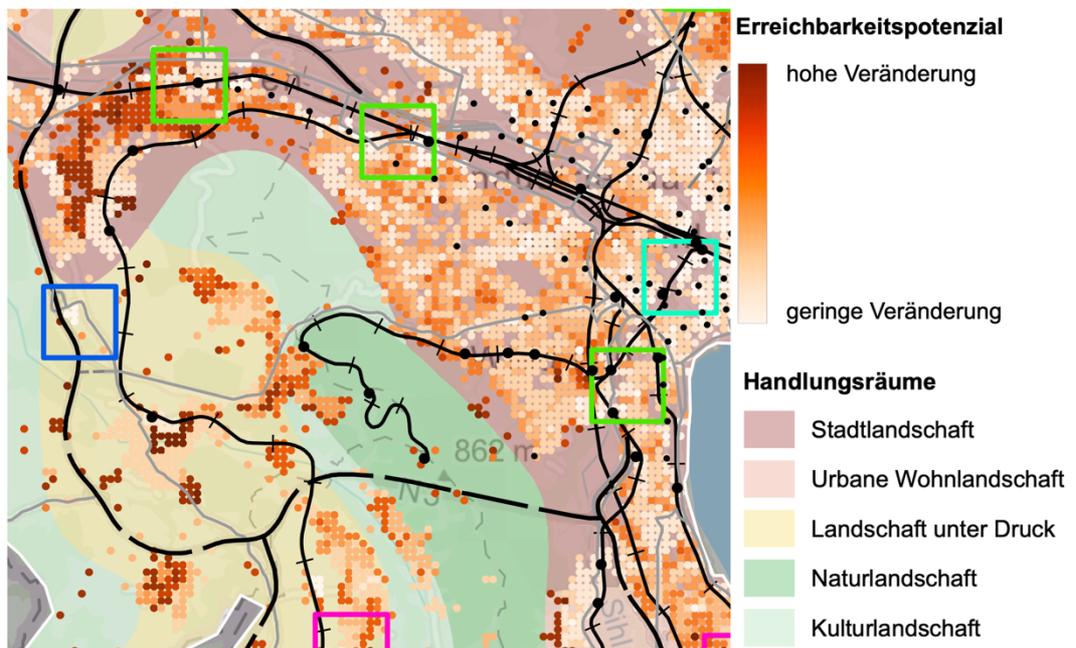


Abb. 57 Erreichbarkeitsveränderung (Variante «kaF-letzte Meile ohne Autobahn») überlagert mit den Handlungsräumen des kantonalen Raumordnungskonzeptes

Die Variante mit der Angebotsform kaF-Autobahn führt zu einer zu grossflächigeren Erreichbarkeitsverbesserungen an den Rändern der Handlungsräume «Stadtlandschaft» und «urbane Wohnlandschaft», zum anderen auch zu Verbesserungen im Handlungsraum «Landschaft unter Druck» (siehe Abb. 58). In letzterem sind entsprechend des kantonalen Raumordnungskonzeptes Erreichbarkeitsverbesserungen jedoch nicht erwünscht.

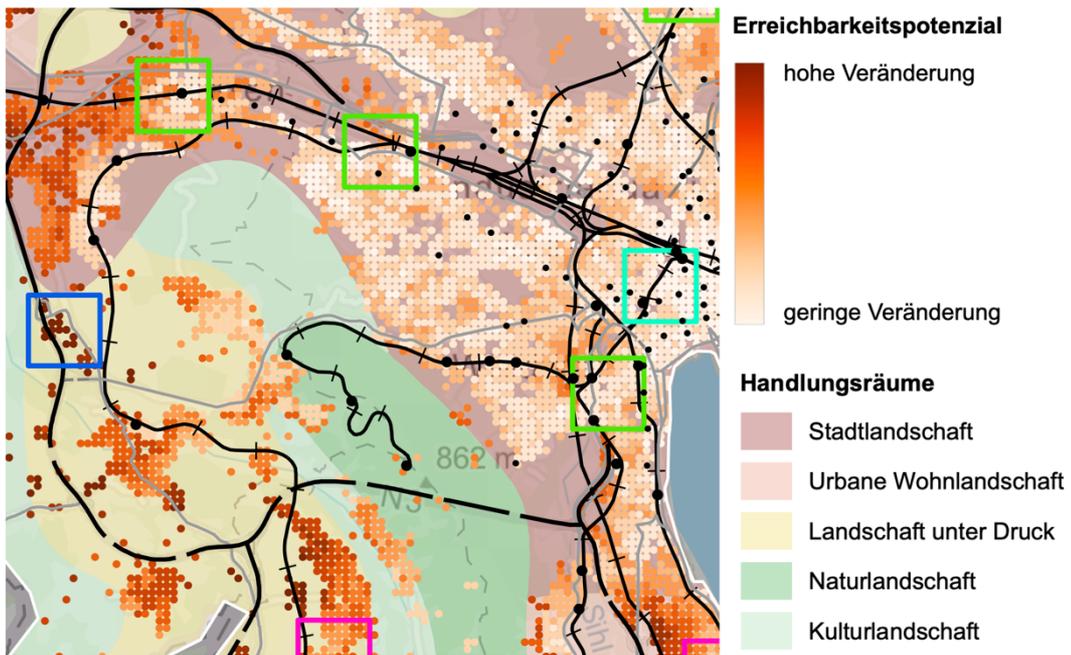


Abb. 58 Erreichbarkeitsveränderung (kaF-letzte Meile mit Autobahn) überlagert mit den Handlungsräumen des kantonalen Raumordnungskonzeptes

Fokussiert man auf die Grenze des Siedlungsgebietes im RZU-Gebiet (vgl. Abb. 59) fällt auf, dass insbesondere ausserhalb des Siedlungsgebiets Verbesserungen der Erreichbarkeit entstehen würden. Angesichts der kantonalen Vorgaben im Raumordnungskonzept, die in diesen Lagen nur eine vergleichsweise geringe Qualität der ÖV-Erschliessung anstreben, könnte das Angebot des kaF die heutige ÖV-Erschliessung ergänzen. Darüber hinaus fällt auf, dass mit der Variante auf der Autobahn (Abb. 59, rechts) im Siedlungsgebiet grossflächigere Erreichbarkeitsverbesserungen zu erwarten wären und die Orte mit guter aF-Befahrbarkeit mehr profitieren. Die Attraktivierung dieser Flächen insbesondere am Siedlungsrand und ausserhalb der Zentren würde auch zusätzliche Verkehrsleistung induzieren.

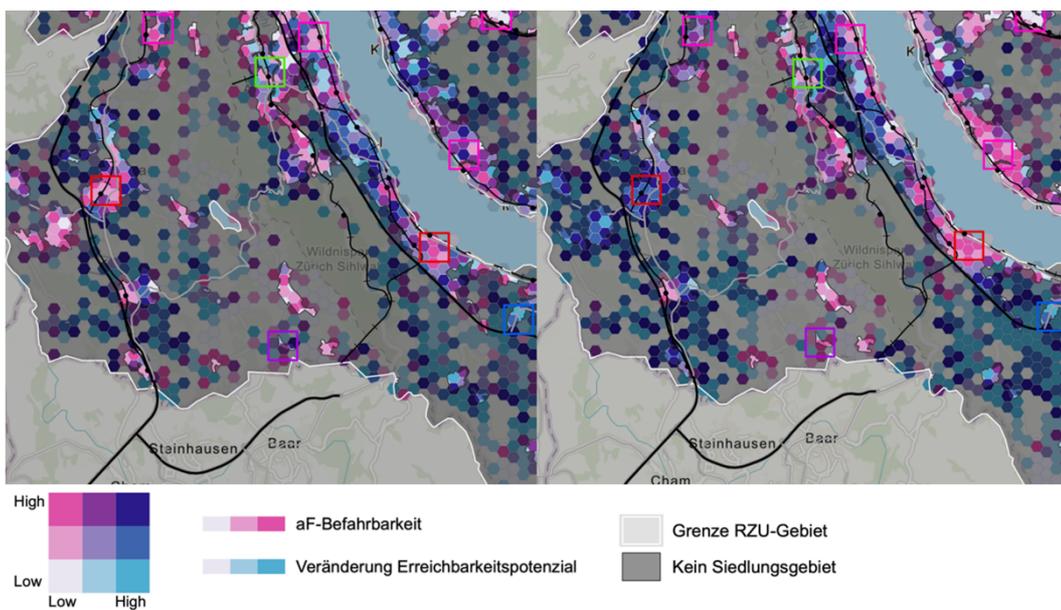


Abb. 59 bivariate Karte Veränderung Erreichbarkeitspotenzial und aF-Befahrbarkeit mit Darstellung des Siedlungsgebiets (links: «kaF-letzte Meile ohne Autobahn», rechts: «kaF-letzte Meile mit Autobahn»)

Die Ziele im Bereich der Siedlungsentwicklung orientieren sich an einer effizienten Flächennutzung und Nutzung des bestehenden Verkehrsnetzes. Die Zunahme des Verkehrsaufkommens soll zu 50 % mit dem ÖV abgewickelt und auch die Anteile des Fuss- und Veloverkehrs erhöht werden. Damit einher geht das Ziel, an Bahnhöfen und weiteren mit dem ÖV gut erschlossenen Lagen geeignete Gebiete für Wohnen und Arbeiten zu verdichten. Neue Angebotsformen auf Basis automatisierter Fahrzeuge erweitern potenziell zum einen das ÖV-Netz und zum anderen die Erreichbarkeitsstruktur. So könnte bei einem nicht zielgerichtet entwickelten Angebot von automatisiertem Fahren eine dispersere Siedlungsstruktur entstehen. Sowohl die dispers-verteilte Erreichbarkeitsverbesserung der Level 4-Inseln als auch die grossmasstäbliche Erreichbarkeitsverbesserung im urbanen Gürtel stellen Verkehrs- und Raumplanung im Fallbeispiel der RZU-Region vor Herausforderungen. Aus heutiger Sicht ist nicht abzuschätzen, wie attraktiv die entstehenden Angebote umgesetzt werden, d.h. auch wie sehr sie die Standortattraktivität prägen werden. Es scheint alles möglich: so könnten die Angebote von der Bevölkerung vor Ort als Belastung aufgefasst werden oder für Betriebe (einiger Branchen) als Standortvorteil wahrgenommen werden. Beide genannten Extremfälle würden die kleinräumliche bzw. regionale Zentrumsentwicklung entschieden prägen. Vor diesem Hintergrund zeigt sich, dass die Durchsetzung von automatisierten Fahrzeugen in Level 4-Inseln verkehrs- und raumplanerische Umsicht braucht, um diese Transformation im Sinne bestehender Zielsetzungen zu gestalten (siehe Kap. 7).

Die Gebäudegrundflächen Pkw-assoziierter Betriebe, die potenziell umgenutzt werden könnten, befinden sich mehrheitlich in den Handlungsräumen «Stadtlandschaft» und «urbane Wohnlandschaft» und damit in jenen Räumen, für die eine weitere Bevölkerungszunahme und Verdichtung vorgesehen ist (siehe Abb. 60). Im Vergleich zur bebauten Fläche der Handlungsräume würde auch ein grösserer Teil Flächen im Handlungsraum «Landschaft unter Druck» zur Disposition stehen, für den kein starkes Bevölkerungswachstum vorgesehen ist. Im Vergleich sind diese Flächen deutlich geringer als die Parkierungsflächen im Strassenraum, wären jedoch auch für andere Nutzungen hinsichtlich Arealentwicklung relevant. Zudem ist zu beachten, dass in einem ersten Schritt neue Flächen für den Betrieb von kaF benötigt werden, bevor Flächen frei werden und einer anderen Nutzung zugeführt werden.

Gebäudegrundfläche (anteilig) PKW-assoziierter Betriebe
nach Handlungsräumen

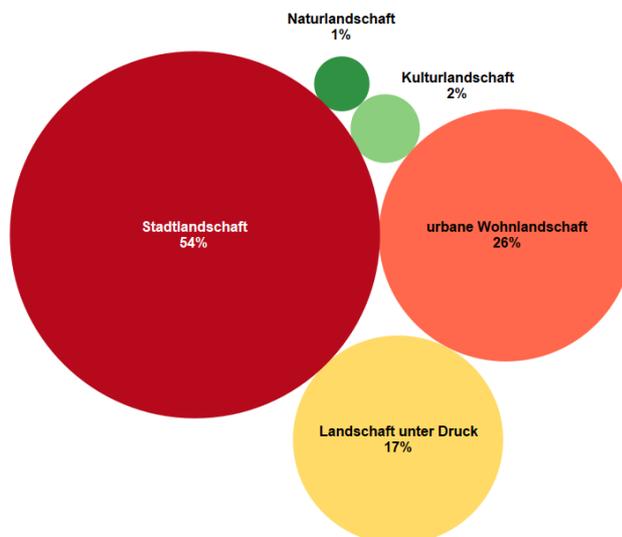


Abb. 60 Gebäudegrundfläche nach Handlungsräumen

6.1.3 Chancen und Risiken

Die Einführung automatisierten Fahrens zeigt in Teilen des RZU-Gebiets Erreichbarkeitsverbesserungen, jedoch auch an Orten, für die dies heute nicht intendiert ist. In der Stadtlandschaft (und je nach Variante auch in der urbanen Wohnlandschaft) verbessert sich die Erreichbarkeit vor allem an den Rändern (etwas bessere Erreichbarkeit mit der Autobahn). Es besteht also durchaus die Möglichkeit, dass über gezieltes Ausweisen von Betriebsgebieten, vielleicht auch nur als "Brückenangebot" bis der klassische ÖV ausgebaut werden kann, neu zu entwickelnde Standorte von einer besseren Erreichbarkeit profitieren. In einem Siedlungsraum wie dem RZU-Gebiet das bereits eine relativ hohe bauliche- und Nutzungsdichte aufweist, können Angebotsformen die eindeutig ihre Stärke in der Versorgung der Fläche (moderater Dichte) haben, sich nur punktuell beweisen. Diese Lagen zu identifizieren, sollte ein primäres Ziel dieser Debatte sein. Die Erreichbarkeitsverbesserungen im Handlungsraum «Landschaft unter Druck» die sowohl im Siedlungsgebiet als auch ausserhalb möglich sind, für den aktuell keine Zunahme der Bevölkerung und Verbesserung des öffentlichen Verkehrs vorgesehen ist, könnten potenziell aktuelle siedlungspolitische Zielsetzungen unterminieren. Diese Wirkung ist insbesondere auch in die Tatsache einzuordnen, dass die Annahme einer kollektiven Nutzung des aF entsprechend der bisherigen Forschungen als eine verträgliche Anwendungsform für diesen Umstand betrachtet wird (u.a. Oehry et al. 2020). Diese hier nachgewiesene Wirkung macht deutlich, dass ein Zustand anzustreben ist, in dem die öffentliche Hand aller Staatsebenen das Ausweisen von kaF-Betriebsgebieten stufengerecht kontrolliert. Andernfalls drohen nicht intendierte Effekte, von denen zusätzlicher induzierter Verkehr der naheliegendste ist.

Chance: Eine räumliche Analyse der Auswirkungen automatisierten Fahrens unterstützt die Festlegung geeigneter aF-Betriebsgebiete und Angebotsformen für dessen Einsatz.

Risiko: Erreichbarkeitsgewinne an peripheren Lagen und ausserhalb des Siedlungsgebiets können zu ungewolltem Bevölkerungs- und Beschäftigtenwachstum führen.

Risiko: Die Erreichbarkeitsverbesserungen durch kaF verändern die relativen räumlichen Unterschiede der Erreichbarkeit. Diese Veränderungen stimmen in Teilen nicht mit den kantonalen, regionalen und kommunalen Zielsetzungen für die Erreichbarkeit und damit zusammenhängend angestrebten Bevölkerungs- und Beschäftigtendichten überein (laut kantonalem Richtplan Zürich). Lagen in den urbanen Räumen, für die eine Attraktivierung durch eine gute Erreichbarkeit erzielt werden soll, können keine Erreichbarkeitsverbesserungen erwarten.

Auch wenn in den Lagen mit heute schlechter ÖV-Gütekategorie die Erschliessung mit kaF verbessert wird, sind die Flächen für arbeitsplatzintensive Nutzungen oder Wohnen weniger geeignet, wenn S-Bahnhöfe zu weit entfernt sind und/oder keine ausreichende Kapazität bereitgestellt werden kann. Dichte Nutzungen, die ein hohes Verkehrsaufkommen generieren, sollten weiterhin an Lagen mit guter Erschliessung durch den konventionellen ÖV angeordnet werden (siehe Abb. 61), da kaF evtl. nur beschränkte Kapazitäten anbieten kann und eine Bündelung der Fahrten weiterhin nötig ist.

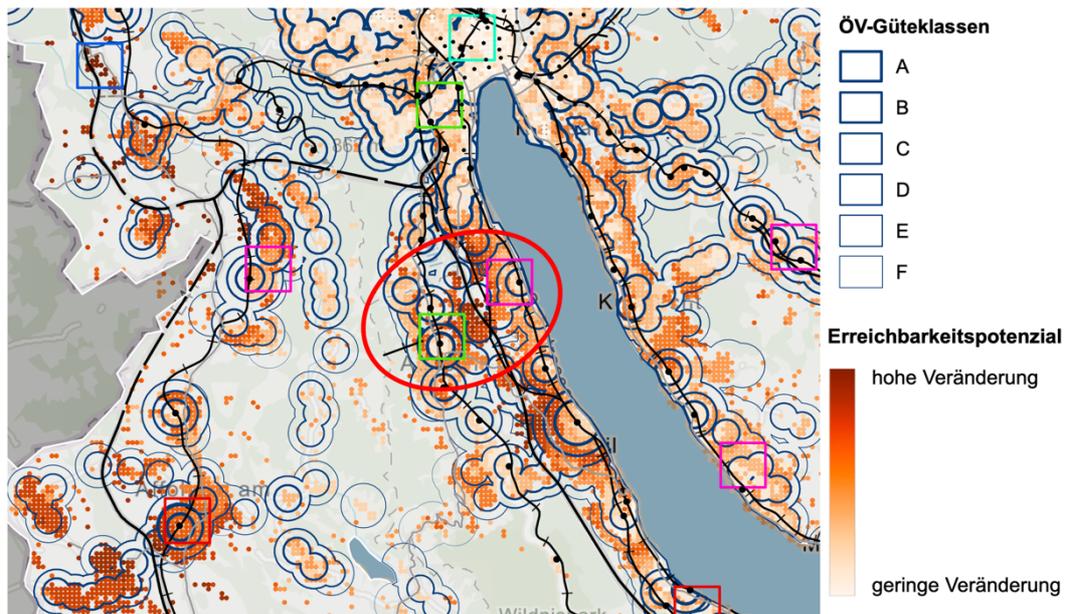


Abb. 61 Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials und aktuelle ÖV-Güteklasse, Variante «kaF-letzte Meile mit Autobahn»

Chance: Insbesondere die Integration der Autobahnen in das ÖV-Netz mittels kaF verbessert die Erreichbarkeit an Lagen in der Stadtlandschaft und urbanen Wohnlandschaft, an denen die geplante Dichte von Bevölkerung und Beschäftigten noch nicht erreicht ist.

Chance: Durch den Einsatz von automatisiertem Fahren können neue Potenzialräume für die Siedlungsentwicklung für den Horizont nach 2040 erschlossen werden.

Risiko: Auch kollektive Angebotsformen von aF können eine disperse Siedlungsstruktur fördern.

Risiko: Je besser die ÖV-Güteklasse heute ist, umso weniger Potenzial gibt es für Verbesserungen der Erreichbarkeit. Die heute durch den ÖV geprägte Zielsetzung für die Siedlungsentwicklung wird abhängig vom Anteil automatisierter Angebotsformen durch eine veränderte Erreichbarkeitsstruktur gefährdet. Die Einhaltung der Ziele zur Verdichtung und Konzentration an der S-Bahn gerät unter Druck.

Bei der Angebotsform automatisiertes Fahren auf der Autobahn, zeigt sich eine deutliche Erreichbarkeitsverbesserung der Siedlungsgebiete entlang der Autobahnen, die die Stadt Zürich hufeisenförmig erfassen. Dieses Angebot könnte genutzt werden, um neue tangentielle Verkehrsrelationen zu schaffen, die bisher im ÖV-Netz nicht, oder nur wenig, enthalten sind. Das S-Bahn-Netz ist hauptsächlich auf radiale Verbindungen durch die Stadt Zürich ausgelegt und tangentielle Busverbindungen sind von untergeordneter Bedeutung. In der absoluten Darstellung der Erreichbarkeitspotenziale (vgl. Kap. 4.3.2) wird offensichtlich, wieviel stärker diese Gebiete auf der Meso-Ebene von der Nutzung der Autobahn gegenüber der Variante mit der Angebotsform «kaF-letzte Meile» profitieren würden. Es wird deutlich, dass mit der Angebotsform «kaF-Autobahn» in einigen Gebieten die Potenziale aus der technischen Befahrbarkeit stärker genutzt werden können als über die alleinige Ergänzung des ÖV-Netzes durch die Angebotsform auf der letzten Meile (vgl. Abb. 62, dunkles blau: grosse Erreichbarkeitsverbesserung bei guter aF-Befahrbarkeit).

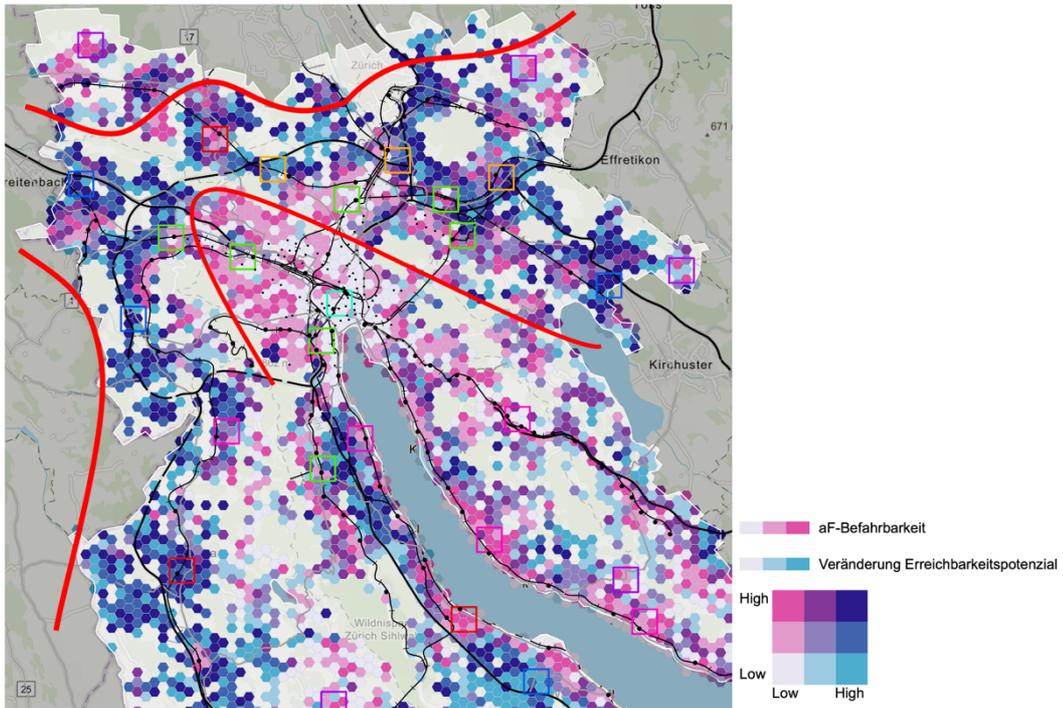


Abb. 62 bivariate Karte Veränderung Erreichbarkeitspotenzial und aF-Befahrbarkeit, Variante «kaF-letzte Meile mit Autobahn»

Der Effekt der Nutzung der Autobahn wird besonders deutlich, wenn man die Verbesserung der Erreichbarkeit nach Beschäftigten für die jeweils höchsten Werte interpretiert. Bei hoher Anzahl von Beschäftigten wird beispielsweise zwischen dem Glattal und dem Limmattal eine attraktive tangentielle Alternative zum MIV denkbar (vgl. Abb. 63: dunkles braun: grosse Erreichbarkeitsverbesserung für viele Beschäftigte).

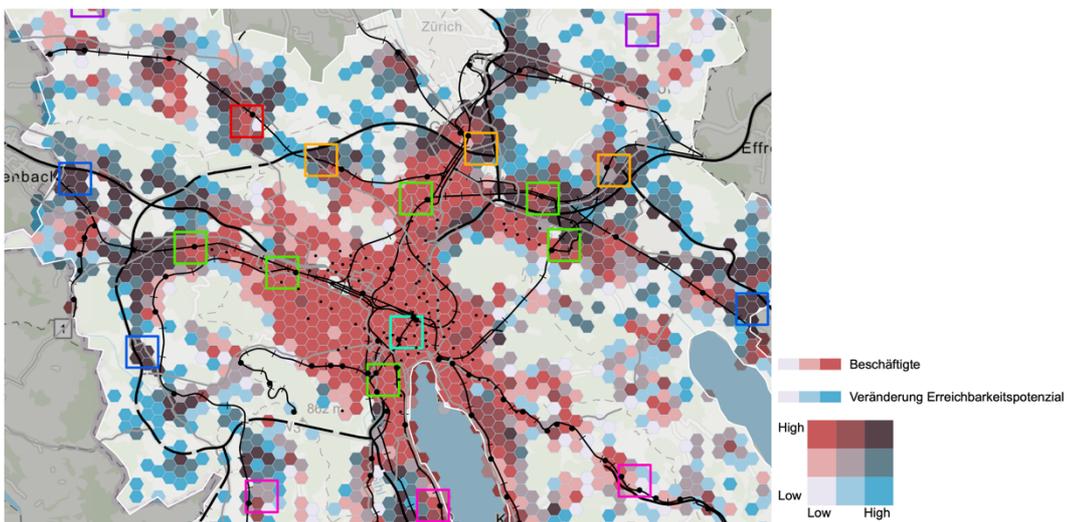


Abb. 63 bivariate Karte Veränderung Erreichbarkeitspotenzial und Beschäftigte, Variante «kaF-letzte Meile mit Autobahn»

Mit kaF auf der Autobahn können bestehende Defizite bei Tangentialverbindungen im RZU-Gebiet behoben werden, ohne dass neue Schieneninfrastruktur geschaffen werden muss. Der Verzicht auf zusätzliche Infrastrukturen reduziert den Ressourcenverbrauch und trägt zum Netto-Null-Ziel bei. Aktuelle Studien bestätigen, dass mit Tangentialverbindungen im urbanen Gürtel Potenziale im ÖV genutzt werden können und damit auch im Verkehrsverhalten ein Beitrag zum Netto-Null-Ziel gegeben wäre (ARE 2021, vgl. Abb. 64). Allerdings kommt dieser Anwendungsfall nicht ohne zusätzliche

Infrastruktur aus. An jeder Autobahnabfahrt (bestehend oder neu zu schaffen) müsste eine Verkehrsdrehscheibe entstehen oder umgestaltet werden, die einen komfortablen Um- oder Zustieg ermöglicht und das neue Angebot in das bestehende ÖV-Angebot integriert. Die konkreten Effekte müssen folglich gesamtheitlich für Bau und Betrieb verglichen werden. Auch eine realistische Einschätzung des zeitlichen Horizonts muss in diese Bewertung einfließen.

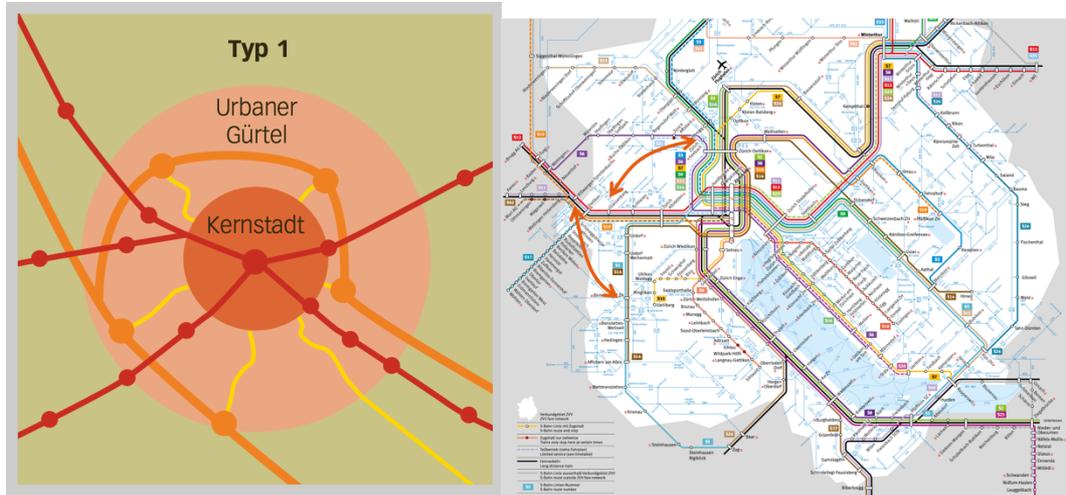


Abb. 64 links: Darstellung der Agglomeration mit Kernstadt und urbanem Gürtel (ARE 2021); rechts: zusätzlich mögliche Tangentialverbindungen (ZVV-Liniennetz und eigene Darstellung)

Chance: Die Nutzung der Autobahn in eine Variante von automatisiertem Fahren zu integrieren, ermöglicht eine Ergänzung des ÖV-Netzes durch attraktive Tangentialverbindungen und damit eine Alternative zum MIV. Damit kann der gezielte Einsatz von aF-Autobahnen in der Agglomeration einen Beitrag zu einem veränderten Mobilitätsverhalten leisten.

Chance: Die Integration der Autobahn in das ÖV-Netz bietet bei ausreichender Kapazität mittel- bis langfristig die Möglichkeit mit bestehenden Infrastrukturen Tangentialverbindungen zu ermöglichen bzw. höhere Kapazitäten für den ÖV bereitzustellen, statt neue Schieneninfrastruktur bauen zu müssen.

Risiko: Die Angebotsform «automatisiertes Fahren auf der Autobahn» kann zu einer erheblichen Erreichbarkeitsverbesserung in der Nähe von Autobahnabfahrten (innerhalb und ausserhalb des Siedlungsgebietes) führen. Wenn diese Entwicklung einsetzt bzw. dieser Weg eingeschlagen wird, so muss dieser mit sehr viel Bedacht sowohl mit verkehrs- (Gestaltung Angebotsformen) als auch mit siedlungsplanerischen Massnahmen (Dimensionierung Bauzone) gestaltet werden .

Angesichts des zu erwartenden Bevölkerungswachstums (+ 30 % bis 2050 im RZU-Gebiet) und der planerischen Zielsetzungen dieses Wachstum vollständig im Bestand zu realisieren, entsteht Flächenbedarf innerhalb des bestehenden Siedlungsgebietes. Die Flächen der Pkw-assoziierten Nutzungen stellen ein mittel- bis langfristiges Potenzial für diese Aufgabe dar. Ein exakter Wert kann aufgrund der zahlreichen Realisierungsmöglichkeiten der Gebäude im Rahmen der geltenden Baubestimmungen nicht bestimmt werden. Gegenüber der Gebäudegrundfläche ist die Parkierungsfläche um den Faktor 10 grösser und bietet neben Flächen für neue Gebäude insbesondere auch Möglichkeiten für neue Flächenallokationen im Strassenraum. Für beide Arten von Flächen ist jedoch zu beachten, dass sie aufgrund des kaF erst mittel- bis langfristig zur Verfügung stehen werden und zu Beginn vor allem ein Mehrbedarf zu managen sein wird (siehe Tab. 24 in Kap 5). Zudem werden insbesondere zusätzliche Flächenbedarfe abhängig von der Umsetzung von kaF räumlich konzentriert auftreten. Die ebenfalls zu erwartenden

Auswirkungen der Energie- und Mobilitätswende auf die Veränderung der Flächenbedarfe wird im Projekt nicht berücksichtigt.

Chance: Nicht mehr benötigte Pkw-assoziierte Flächen und Parkierungsflächen stehen langfristig für die Innenentwicklung zur Verfügung. Zudem können Parkierungsflächen im Strassenraum umgewidmet werden.

Risiko: Der zusätzliche Flächenbedarf für den Betrieb von kaF, insbesondere in der Anfangsphase des Mischverkehrs, verstärkt den Nutzungsdruck auf die Flächen und erschwert die Abwägung aller raumplanerischen Belange.

6.2 Ebene Gebietstypen, Gemeinden (Meso)

Nachdem nun die Ergebnisse auf der Makro-Ebene interpretiert und daraus Handlungsoptionen abgeleitet wurden, folgt die Betrachtung auf der Meso-Ebene. Die Meso-Ebene wirft den Blick auf die hierfür konzipierten Gebietstypen.

6.2.1 Interpretation der Ergebnisse

aF-Befahrbarkeit

Um die Ergebnisse der Befahrbarkeit inhaltlich und räumlich differenziert zu interpretieren, wurden diese nach Gebietstyp sortiert ausgewertet (vgl. Kap 3.3.2, Tab. 7, Abb. 25). Die vergleichsweise gute aF-Befahrbarkeit im Gebietstyp «Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss», in den dörflichen Gebietstypen und im «peripheren Zentrumsgebiet» lässt Rückschlüsse auf die geringere Komplexität bzw. eine "Autoaffinität" der dortigen Strassenräume zu.

Erreichbarkeitsveränderung

Die Ergebnisse zur Erreichbarkeit spiegeln diese Unterschiede der Gebietstypen wider. Jedoch kann aus den Ergebnissen auch geschlossen werden, dass nicht alle Gebiete, in denen eine gute aF-Befahrbarkeit gegeben ist, eine hohe Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials erreichen. Dies hängt unter anderem mit dem bestehenden Erreichbarkeitspotenzial im ÖV und der lokalen Einbindung ins Verkehrsnetz zusammen. Bei schlechteren Voraussetzungen für eine lokale Einbindung ergibt sich das umgekehrte Bild, und Gebiete mit schlechter aF-Befahrbarkeit zeigen trotzdem grosse Verbesserungen des Erreichbarkeitspotenzials (vgl. Anhang II 2, bivariate Karten aF-Befahrbarkeit und Erreichbarkeitsverbesserung).

Veränderte Flächenbedarfe

Im Vergleich der Gebietstypen liegen die Potenzialflächen insbesondere im «Industrie-/Gewerbegebiete mit Autobahnanschluss» und in den dichten Mischgebieten, wobei das «Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss» eine relativ geringe Menge von Parkierungsflächen aufweist (vgl. Abb. 55). Letzteres deutet zusammen mit der Annahme, dass Unternehmen normalerweise eigene Parkierungsanlagen nutzen, daraufhin, dass im Strassenraum tendenziell weniger Flächen frei werden könnten. Dies bietet gerade dort die Möglichkeit Areale weiterzuentwickeln. Die dichten Mischgebiete könnten dahingehend von einer stärkeren Umnutzung von Parkierungsflächen profitieren, die eher abseits einer Bebauung liegen könnten. Noch stärker gilt dies für den Gebietstyp «Innenstadt Zürich». Insbesondere in den dörflichen Gebieten ist voraussichtlich mit geringen Potenzialflächen zu rechnen, da diese evtl. aufgrund der kleinteiligeren Parzellen- und Eigentümerstruktur in geringerem Umfang aktivierbar sein dürften.

6.2.2 Abgleich mit raumplanerischen Zielsetzungen

Für die Gebietstypen sind ebenfalls die Zielsetzungen für die räumliche Entwicklung nach dem kantonalen Raumordnungskonzept relevant, die in den Handlungsräumen spezifiziert werden. Zudem wurden auf regionaler Stufe im Regio-ROK für 2030 Nutzungsdichteziele in Bevölkerung und Beschäftigte pro Hektar festgelegt (vgl. Kap. 2.2). Die Abb. 65 zeigt das Ergebnis des Vergleichs dieser Zieldichten mit den Dichten von 2020 aus der Quartieranalyse des Kantons Zürich. Es werden jene Flächen abgebildet (schwarz), wo die Zieldichten für 2030 noch deutlich nicht erreicht sind. In der Überlagerung mit der bivariaten Karte zeigt sich, dass diese Flächen zum Teil in Bereichen mit geringem Potenzial für Erreichbarkeitsverbesserungen (rosa) liegen. Im Fall vom Limmattal ist jedoch, wie beschrieben, das Potenzial durch die Limmattalbahn noch nicht abgebildet.

Insbesondere für die dörflichen Gebietstypen ist auch in dieser übergeordneten Planungsgrundlage keine Zunahme von Bevölkerung und Beschäftigten sowie Verbesserung der Erreichbarkeit vorgesehen. Es sind jedoch gerade auch diese Gebiete, deren Erreichbarkeit mit kaF deutlich gegenüber heute verbessert werden würde (pinke und violette Gebietstypen). Die dörflichen Gebiete gewinnen dabei bereits bei der Variante kaF-letzte Meile.

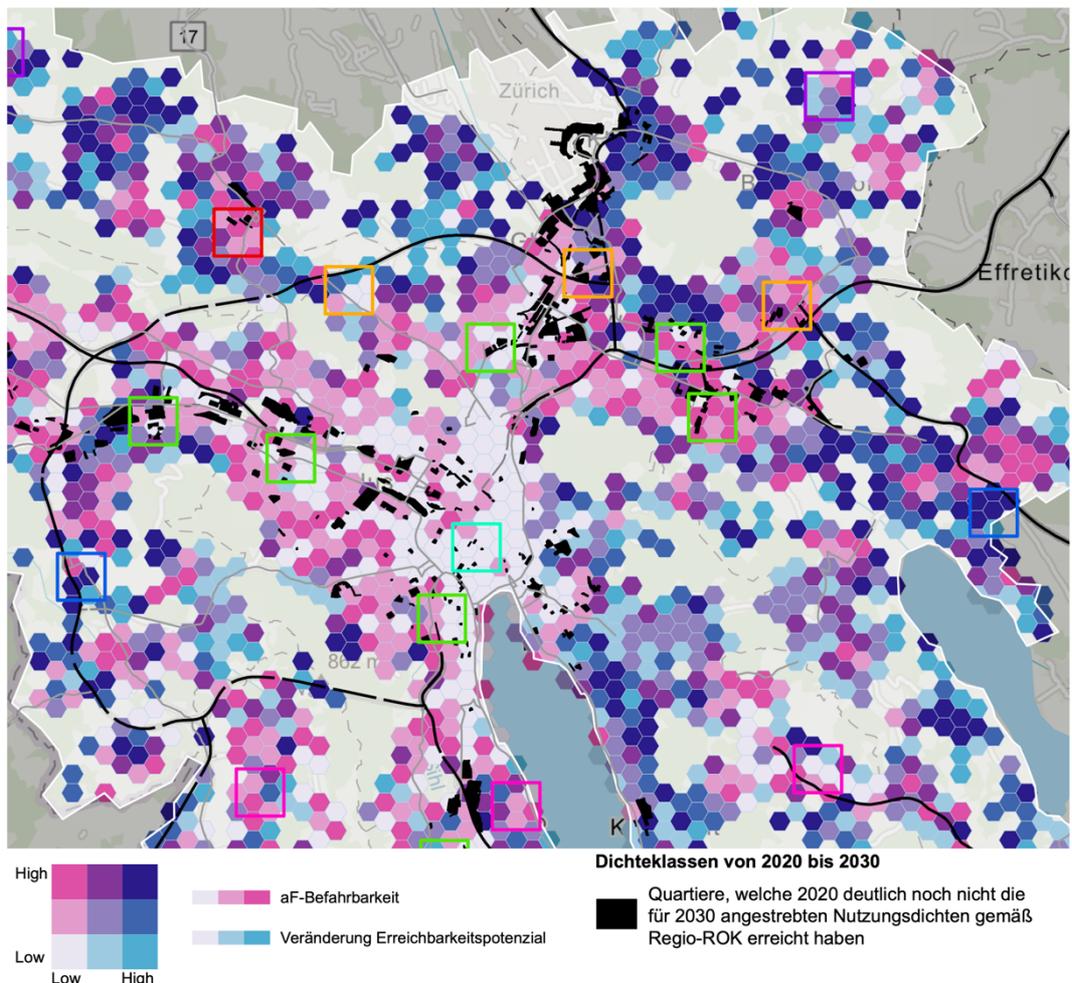


Abb. 65 bivariate Karte Veränderung Erreichbarkeitspotenzial und aF-Befahrbarkeit, Variante «kaF-letzte Meile ohne Autobahn», mit Darstellung der Quartiere, welche 2020 deutlich noch nicht die für 2030 angestrebten Nutzungsdichten gemäß Regio-ROK erreicht haben (schwarze Flächen)

Die Ergebnisse für die Potenzialflächen entsprechen durch geringe Verfügbarkeit in den dörflichen Gebietstypen den Zielen einer Innenentwicklung. Zudem besteht die Möglichkeit insbesondere in dichten Gebieten von einer Aufwertung des Strassenraums durch wegfallende Parkierungsflächen zu profitieren. Unter Berücksichtigung der Überlegungen zur Flächendynamik in Kapitel 6.1.4 ist jedoch einzuschränken, dass abgesehen von den «Industrie-/Gewerbegebieten mit Autobahnanschluss» die Gebietstypen mit den hohen Potenzialflächen voraussichtlich weniger von guter aF-Befahrbarkeit und hohen Erreichbarkeitsverbesserungen profitieren. Im Gebietstyp «Industrie-/Gewerbegebiete mit Autobahnanschluss» könnten diese Flächen mittelfristig auch den Bedarf für Logistik befriedigen.

6.2.3 Chancen und Risiken

Auch wenn sich das Bild je nach Variante kollektiver Angebotsformen deutlich unterscheidet, sind es vor allem Lagen im Agglomerationsgürtel direkt angrenzend an die Stadt Zürich und in intermediären Räumen, die stark profitieren.

Im Gebietstyp «Industrie- und Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss» mit der relativ guten aF-Befahrbarkeit bietet sich mit automatisiertem Fahren die Chance, massgeschneiderte Anwendungsformen hinsichtlich aF-Betriebsgebiet und -zeit zu entwickeln, die in betrieblichem Mobilitätsmanagement strategisch für eine Verlagerung auf den ÖV eingesetzt werden können.

Chance: Industrie- und Gewerbegebiete mit automatisiertem Fahren entsprechend der Bedürfnisse der Unternehmen und Beschäftigten und in Abstimmung mit den Zielsetzungen der Gemeinden erschliessen.

Im Beispiel von Dietikon-Silbern etwa ist zur Verbesserung eine neue S-Bahn-Station geplant (vgl. Kantonaler Richtplan Zürich). Angebotsformen von automatisiertem Fahren können so evtl. schon früher die Nutzung des ÖV attraktivieren und somit eine Veränderung des Verkehrsverhalten einleiten, noch bevor die S-Bahnstation eröffnet wurde (vgl. Abb. 66). Nach Realisierung der S-Bahn-Station kann das Angebot flexibel den neuen Wegen angepasst werden. Die Debatte um Infrastruktur vs. intelligente Lösungen kann mit kollektiven Angebotsformen deutlich breiter geführt werden. Jedoch ist zu berücksichtigen, welche Kapazität mit kaF erreicht werden kann und wie ein möglicher Umbau auf ein System mit höherer Kapazität antizipiert werden kann.

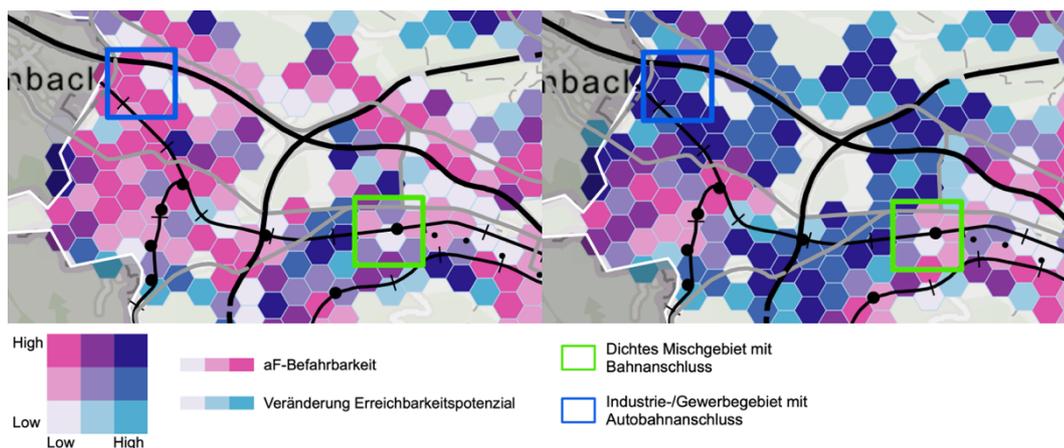


Abb. 66 bivariate Karte Veränderung Erreichbarkeitspotenzial und aF-Befahrbarkeit, Varianten «kaF-letzte Meile ohne Autobahn» (links) und «kaF-letzte Meile ohne Autobahn» (rechts), um Dietikon/Silbern (blauer Gebietstyp)

Chance: kaF kann als Brückenangebot in Ergänzung zum ÖV funktionieren, bis andere Infrastrukturen entwickelt sind. Dies gilt allerdings vor allem für kaF auf der letzten Meile.

Risiko: Das Einrichten der nötigen Infrastruktur für automatisiertes Fahren (Anpassungen Fahrbahn, Servicestellen, etc.) bringt grosse Initialkosten mit sich, während der Nutzen zu Beginn noch nicht gleichwertig hoch sein könnte. Denn es wird voraussichtlich Zeit in Anspruch nehmen, bis das Angebot von der Bevölkerung angenommen wird.

Die Flächenpotenziale sind aufgrund ihres räumlich unterschiedlichen Auftretens und ihrer zeitlichen Verzögerung sorgfältig zu bewerten und einzuschätzen. In urbanen Lagen können sie der Innentwicklung dienen, sind jedoch durch die dort häufig schlechtere aF-Befahrbarkeit und geringeren Erreichbarkeitsverbesserungen wahrscheinlich später verfügbar. Gleichzeitig werden dort wahrscheinlich weniger zusätzliche Flächenbedarfe durch Depots für kaF erwartet. Im Gebietstyp «Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss» sind sowohl aF-Befahrbarkeit als auch Erreichbarkeit kaF gut, so dass die Potenziale hier wahrscheinlich besser genutzt werden könnten.

Chance: Insbesondere in den Gebietstypen «Industrie-/Gewerbegebiet mit Autobahnanschluss» und den dichten Mischgebieten sind Flächenpotenziale zu erwarten, welche im Rahmen der raum- und verkehrsplannerischen Zielsetzungen in längerem Horizont genutzt werden können.

Risiko: Der zusätzliche Flächenbedarf insbesondere für Depots in den Betriebsgebieten verstärkt die Herausforderungen der Innenentwicklung durch weitere Ansprüche an die begrenzten verfügbaren Flächen. Ein Szenario in dem viele Anbieter:innen um Kund:innen werben, würde diese Situation verschärfen.

6.3 Ebene innerhalb der Gebietstypen, Strassenraum (Mikro)

Der Detaillierungsgrad der Analysen ohne ein Betriebskonzept des kaF rechtfertigt auf der Mikroebene keine räumlich konkreten Aussagen. Zudem wurden die Erreichbarkeitsberechnungen im Hektarraster ausgeführt. Jedoch können auf einer generellen Ebene Auswirkungen der Erreichbarkeitsänderungen innerhalb der Gebietstypen und im Strassenraum abgeschätzt und grundlegenden Zielen gegenübergestellt werden. Aus dieser Betrachtung werden Handlungsoptionen und Regulierungsbedarfe diskutiert.

6.3.1 Interpretation der Ergebnisse

aF-Befahrbarkeit

Innerhalb der Gebietstypen sind die Ergebnisse sowohl für die aF-Befahrbarkeit als auch die Erreichbarkeit und den Flächenbedarf unterschiedlich. Dabei hat die Befahrbarkeit kleinräumig den grössten Einfluss auf die Erreichbarkeit und bestimmt, wo ein Service auf der letzten Meile angeboten werden kann (vgl. Abb. 67).

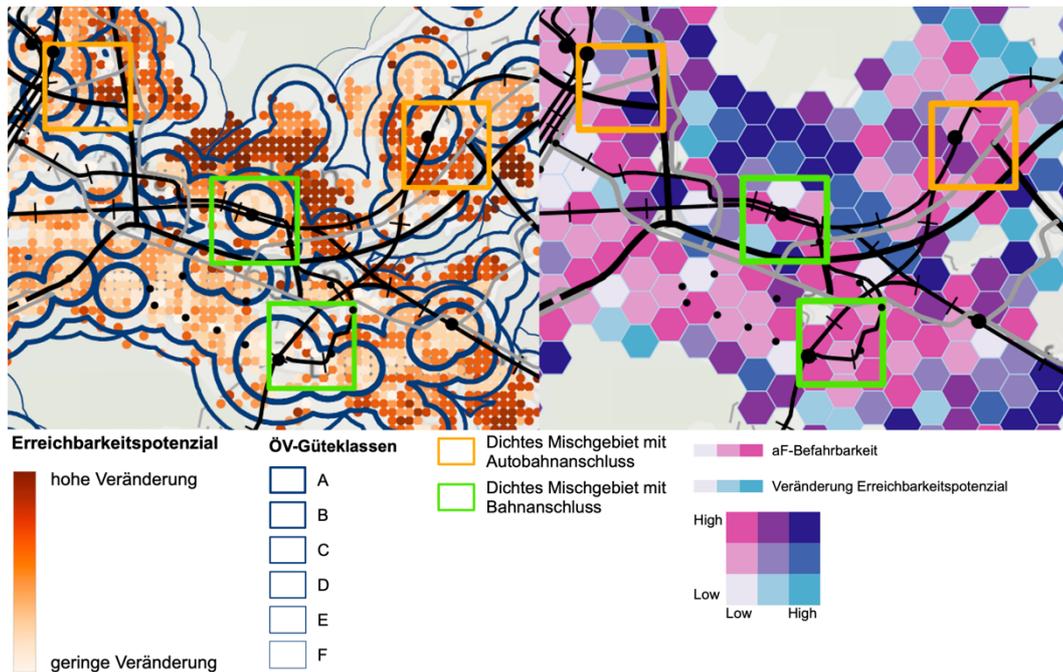


Abb. 67 Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials und aktuelle ÖV-Güteklasse (links) sowie bivariate Karte Veränderung Erreichbarkeitspotenzial und aF-Befahrbarkeit (rechts), Variante «kaF-letzte Meile ohne Autobahn», Übergangsbereich Stadt Zürich-Glattal

Erreichbarkeitsveränderung

Höhere Erreichbarkeitsveränderungen ergeben sich durch die kleinräumige ÖV-Erschliessung. Je grösser die Entfernung zum Bahnhof und je schlechter die ÖV-Güteklasse sind, umso höhere Erreichbarkeitsverbesserungen sind zu beobachten (Abb. 68). Kleinräumige Erreichbarkeitsverbesserungen direkt um die ÖV-Knoten zeigen sich dort, wo die aF-Befahrbarkeit des Strassennetzes gut ist. Damit tritt kaF in direkte Konkurrenz zum Fuss- und Veloverkehr.

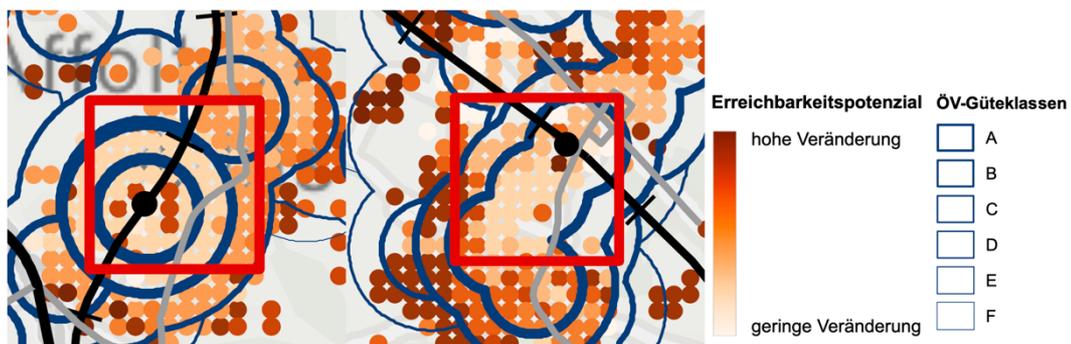


Abb. 68 Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials und aktuelle ÖV-Güteklasse, Varianten «kaF-letzte Meile ohne Autobahn» (links) und «kaF-letzte Meile ohne Autobahn», um die S-Bahnstationen in den Gebieten Affoltern a.A. (links) und Regensdorf (rechts)

Die Analyse in Kap. 3 zeigt, dass in vielen Fällen eine gute aF-Befahrbarkeit in weniger dichten Gebieten (beispielsweise Einfamilienhausquartiere oder Industrie- und Gewerbegebiete) und an Siedlungsrändern besteht. Betrachtet man die aF-Befahrbarkeit und die Erreichbarkeitsverbesserung, spielen gute Befahrbarkeit und schlechtere ÖV-Erschliessung zusammen und führen insbesondere in den Randlagen, beispielsweise im Furtal/Glattal, oder an den Seeufern in den Hanglagen (vgl. Abb. 69), zu einer deutlichen

Erreichbarkeitsverbesserung. Diese Tendenz zeigt sich sowohl für «kaF-letzte Meile» als auch für die Variante mit beiden Angebotsformen.

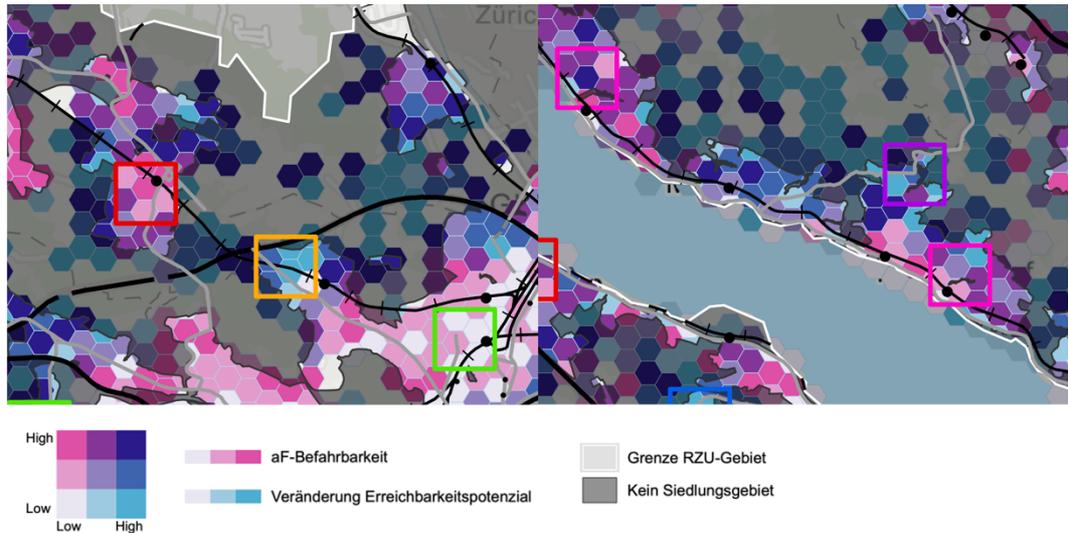


Abb. 69 bivariate Karte Veränderung Erreichbarkeitspotenzial und aF-Befahrbarkeit mit Darstellung des Siedlungsgebiets, links: «kaF-letzte Meile mit Autobahn», Regensdorf-Rümlang-Zürich-Seebach, rechts: «kaF-letzte Meile ohne Autobahn», Männedorf-Stäfa)

Veränderte Flächenbedarfe

Der Betrieb von kaF benötigt neue und veränderte Infrastrukturen (siehe Kap. 5). Diese Flächen haben jedoch einen geringeren Umfang als die potenziell freiwerdenden Flächen. Da die aF-Befahrbarkeit an zentralen Lagen gering ist und dort häufig geringere Erreichbarkeitsverbesserungen zu erwarten sind, werden diese Anforderungen insbesondere in Randlagen bzw. an Verkehrsdrehscheiben in der Agglomeration und den Aussenbezirken der Stadt Zürich gestellt werden.

Im Projekt wird auf kollektive Angebotsformen im Personenverkehr fokussiert, was, wenn diese Angebotsformen akzeptiert werden, längerfristig zu einem abnehmenden Fahrzeugbesitz führt. Mit stärkerer Marktdurchdringung ist darum auch mit einem geringeren Bedarf an Parkierungsflächen bei privaten und öffentlichen Nutzungen zu rechnen. Es ist jedoch erst mittelfristig von spürbaren räumlichen Effekten im Strassenraum und auf weiteren Flächen auszugehen.

6.3.2 Abgleich mit raumplanerischen Zielsetzungen

Innerhalb der Gebietstypen und für die Gestaltung der Strassenräume sind aufgrund der eingeschränkten räumlichen Genauigkeit der Aussagen folgende Zielsetzungen (vgl. Kap. 2.2, kantonaler Richtplan) relevant, auf die generell Bezug genommen wird:

- Verdichtung an gut mit dem ÖV erschlossenen Lagen, geringe Verdichtung am Siedlungsrand bei Beibehaltung der ÖV-Erschliessungsqualität
- Verschiebung des Modal Splits zu ÖV, Fuss- und Veloverkehr
- Hohe Aufenthaltsqualität, insbesondere in den Zentren
- Kanalisierung des Verkehrs auf dem übergeordneten Netz, Entlastung von Wohnstrassen von Durchgangsverkehr
- Klimagerechte Gestaltung, Kaltluftströme freihalten
- Geringe Versiegelung

Für die zuvor beschriebenen Gebiete am Siedlungsrand wird in der Regel von den übergeordneten raumplanerischen Instrumenten eine Beibehaltung der Dichte und Struktur angestrebt. Dies steht mit den deutlichen potenziellen Erreichbarkeitsverbesserungen im Widerspruch, auch wenn generell eine Verschiebung des Modal Splits zum ÖV erfolgen soll. Wenn die Erreichbarkeitsverbesserungen genutzt werden sollten, kann dies in diesen Gebieten aufgrund der Zu- und Wegfahrten temporär und lokal zu zusätzlichen Fahrten und höherer Verkehrsbelastung führen, die der Entlastung der Wohnstrassen von Verkehr widersprechen kann. Die Berücksichtigung der Befahrbarkeit verstärkt diesen Effekt.

Für die konkret vorgeschlagenen Betriebsgebiete können langfristig die Strassenräume durch wegfallende Parkierungsflächen, bei Berücksichtigung eventueller Flächen für Depots, zugunsten von Klima und Aufenthalt umgestaltet werden.

6.3.3 Chancen und Risiken

Die Veränderung der Erreichbarkeit beinhaltet kleinräumig sowohl Risiken als auch Chancen hinsichtlich der Bevölkerungsentwicklung und der Nutzung der Verkehrsmittel, die gegeneinander abgewogen werden sollten. Aus dieser Abwägung und der Ermittlung von Defiziten in der Erreichbarkeit können geeignete Betriebsgebiete ausgewiesen werden. Gleichzeitig bieten die Betriebsgebiete gerade im Agglomerationsgürtel die Chance Verhaltensänderungen zu forcieren und die verkehrlichen und räumlichen Potenziale für kaF zu nutzen.

Chance: Mit der Ausweisung von aF-Betriebsgebieten können gerade im Agglomerationsgürtel gewünschte Verhaltensänderung zum ÖV forciert werden.

Risiko: Die kleinräumige Verbesserung der Erreichbarkeit am Siedlungsrand und abseits der Bahnhöfe birgt die Gefahr einer Schwächung bestehender Zentrenstrukturen.

Risiko: Aus einer zu starken Verdichtung in weiterer Entfernung von Bahnhöfen können Bündelungsbedarfe und nötige Kapazitäten resultieren, die nicht mehr mit kaF bedient werden können.

Chance: Mit der Verbesserung der Erreichbarkeit durch kaF-letzte Meile kann kleinräumig abseits gut bündelbarer Fahrtwünsche die Erreichbarkeit mit dem ÖV gesteigert, dort an geeigneten Lagen die Verdichtung unterstützt und ein Umstieg auf den ÖV gefördert werden.

Neben einer verträglichen/angemessenen Anordnung und Dimensionierung der Depots und Verkehrsdrehscheiben auf der Mesoebene können diese auf der Mikroebene sowohl die Verkehrsbelastung um die Standorte erhöhen als auch durch ihre Grösse die städtebauliche Einordnung erschweren behindern.

Chance: Der Raumgewinn durch Reduktion der Parkierungsflächen bieten Platz für mehr Klimaanpassungsmassnahmen, beispielsweise mit Entsiegelung von Flächen oder grösserem Baumbestand.

Chance: Der potenziellen Konkurrenz von kaF auf der letzten Meile mit dem Fuss- und Veloverkehr kann mittel- bis langfristig durch eine bessere Aufenthaltsqualität in den Strassenräumen begegnet werden, wenn die reduzierten Parkierungsflächen für Gestaltungsmassnahmen genutzt werden.

Chance: Mit kaF könnte der Bedarf an Park & Ride-Flächen abnehmen und zusehends anderen Nutzungen zugeführt bzw. teilweise für kaF genutzt werden.

Risiko: Der zusätzliche Flächenverbrauch für Depots und Halteflächen kann die freiwerdenden Flächen (über-)kompensieren, insbesondere zu Beginn der Phase des Mischverkehrs, wenn die Flächenbedarfe tendenziell zunehmen.

Risiko: Es kann um die Depots und Verkehrsdrehscheiben eine hohe Verkehrsbelastung und damit Beeinträchtigung der Aufenthalts- und Verkehrsqualität entstehen.

Kleinräumig ergeben sich durch die teilweise schlechte aF-Befahrbarkeit Einschränkungen in der Nutzung von kaF. Es ist möglich, dass daraus der Bedarf entsteht, die Strassenräume anzupassen, so dass sie von automatisierten Fahrzeugen leichter bewältigt werden können und sinnvolle Abgrenzungen von Betriebsgebieten festgelegt werden können. Strassenräume sind jedoch dann besser befahrbar, wenn sie weniger belebt und die Verkehrsflächen stärker getrennt sind. Insbesondere in Zentren, aber auch insgesamt in den Städten und Gemeinden steht dies den Zielen hoher Aufenthaltsqualität und attraktiver Zentren entgegen.

Chance: Durch die zunehmende Substituierung des MIV durch eine Kombination von kaF, ÖV, Fuss- und Veloverkehr werden im Strassenraum Flächen frei, die anderen Nutzungen zugeführt werden können.

Risiko: Eine Anpassung des Strassenraums mit dem Ziel einer besseren aF-Befahrbarkeit kann zu grösserem Flächenverbrauch, geringerer Aufenthaltsqualität, grösserer Trennwirkung und letztlich geringerer Attraktivität der Zentren führen.

Risiko: Durch kaF entstehen bereits zu Beginn der Einführung von aF moderate neue Flächenbedarfe.

Risiko: Die Integration von kaF an den Verkehrsdrehscheiben benötigt neue Flächen an bestehenden Bahnhöfen, die heute zunehmend auf Aufenthalt, Fuss- und Veloverkehr ausgelegt sind und ist damit sehr anspruchsvoll.

Risiko: Mit der Einführung von kaF entstehen zusätzliche Nutzungskonflikte im Strassenraum, insbesondere an dichten Lagen.

7 Fragen und Handlungsempfehlungen bei der Einführung des (kollektiven) automatisierten Fahrens

7.1 Einordnung der Ergebnisse

Im Projekt wurde ein spezielles Szenario für die Analysen ausgewählt, das eine im Personenverkehr mehrheitlich kollektive Nutzung der automatisierten Fahrzeuge in Ergänzung zum heutigen öffentlichen (Schiene-)Verkehrssystem vorsieht. Mit dieser Einschränkung erhofft man sich allgemein positivere Wirkungen als bei einer individuellen Nutzung. Dies liegt unter anderem daran, dass aus Simulationsstudien bei einer individuellen Nutzung befürchtet wird eine hohe Anzahl an Fahrzeugen zu benötigen und zusätzlich mit Leerfahrten eine starke Be-(Über-)lastung des Strassennetzes erwartet wird. Die Analysen und deren Interpretation sollen einen Beitrag leisten, die Wirkungen dieses Szenarios einzuordnen. Jedoch ist nicht von allein gegeben, dass ein solches Szenario eintreten wird. Eine kollektive Nutzung automatisierter Fahrzeuge wäre nur mit klaren regulatorischen Vorgaben erreichbar.

Die Analysen im RZU-Gebiet zeigen die nachfolgenden Kernaussagen, die im Grundsatz unter Berücksichtigung der jeweiligen Zielsetzungen auf andere Räume übertragbar sind.

- Betrachtet man die Verbesserung der Erreichbarkeit zusammen mit der planerisch angestrebten Dichte von Bevölkerung und Beschäftigten zeigen sich Orte, für die eine Verbesserung wünschbar sein kann. Diese oder ähnliche Analysen sind wertvoll um potenzielle Betriebsgebiete für kaF in wahrscheinlich naher Zukunft gezielt planen zu können.
- Auch mit kollektiver Nutzung ist ohne zielgerichtete Regulierung des Angebotes eine Erreichbarkeitsverbesserung in peripheren Lagen und ausserhalb des Siedlungsgebietes zu erwarten.
- Die Nutzung der Autobahn verbessert die Erreichbarkeit deutlich, jedoch im RZU-Gebiet insbesondere auch in Lagen, für die dies planerisch nicht gewünscht ist. Zudem bedingt die Nutzung der Autobahn durch kaF eine betriebliche und infrastrukturelle Integration in das ÖV-System, die einer sorgfältigen Planung bedarf und erst mittel- bis langfristig möglich ist.
- Mit der Einführung von kaF ergeben sich kurzfristig neue Flächenbedarfe, langfristig werden Flächen für Pkw-assoziierte Nutzungen und insbesondere Parkierungsflächen frei werden.

Angesichts der Chancen und Risiken einer Einführung von kaF für die raum- und verkehrsplanerischen Zielsetzungen auf allen Staatsebenen ist es nötig eine gesellschaftliche und politische Diskussion zu führen, wie die Chancen genutzt und den Risiken begegnet werden kann. Der aktuelle Diskurs zum automatisierten Fahren fokussiert angesichts der auf lange Sicht möglichen starken strukturellen Auswirkungen zu wenig auf diese Fragen. Die technische Machbarkeit und der sichere Betrieb von automatisierten Verkehrssystemen sind genauso wie rechtliche Fragestellungen zwar eine wesentliche Voraussetzung für eine sichere und geordnete Einführung eines neuen Verkehrsmittels, die Auseinandersetzung sollte hier jedoch nicht enden. Über das automatisierte Fahren hinaus sind unter dem Stichwort Mobilitäts- und Energiewende noch weitere Veränderungen im Verkehrsbereich zu erwarten. Diese Aspekte wurden im Projekt nicht berücksichtigt, jedoch sind ähnliche Fragen und Effekte wie beim automatisierten Fahren zu erwarten (beispielsweise anzunehmender reduzierter Parkflächenbedarf) und sollten in einer zukünftigen Diskussion miteinbezogen werden.

Nachfolgend werden basierend auf den Erkenntnissen im Projekt relevante Fragestellungen und erste Handlungsempfehlungen ausgeführt. Einzelne Argumente und

Aspekte aus den vorherigen Kapiteln werden zur besseren Nachvollziehbarkeit nochmals aufgegriffen.

7.2 Offene Fragen und Handlungsempfehlungen

Warum sollte aF und auch kaF reguliert werden?

Die Ausführungen in Kapitel 6 zeigen auf, dass sich mit dem automatisierten Fahren einerseits die Chance bietet über eine gezielte Einführung automatisierten Fahrens Erreichbarkeitsverbesserungen an Lagen zu schaffen, für die eine starke Bevölkerungsentwicklung richtplanerisch zum Ziel gesetzt wurde oder Defizite in der ÖV-Erschliessung ausgeglichen werden sollen. Andererseits sind an peripheren Lagen und ausserhalb des Siedlungsgebiets Erreichbarkeitsverbesserungen absehbar, die eine regulierte Nutzung automatisierter Angebotsformen nötig erscheinen lassen. Eine Beschränkung des automatisierten Fahrens auf eine kollektive Nutzung ist hierbei bereits ein wesentlicher Ansatz der Regulierung. Ergänzend zur Regulierung von (k)aF sollte dies auch durch entsprechend starke raumplanerische Massnahmen begleitet werden. Für automatisierte Angebotsformen, die insbesondere in der Fläche die Erreichbarkeit verbessern, sind neben der Regulierung auch geeignete Flächen für deren Einsatz zu identifizieren.

Neben den Wirkungen auf die Erreichbarkeit sind mit einer Einführung von (k)aF auch Auswirkungen auf die Flächennutzung zu erwarten. Der zusätzliche Flächenbedarf ist zwar relativ gering, kommt jedoch zu den bereits vorhandenen Ansprüchen an die knappen Flächen im Siedlungsgebiet in Zeiten der Innenentwicklung hinzu: Sicherung von Flächen für Güterverkehr, preisgünstiger Wohnungsbau etc. Geeignete Vorgaben bei der Einführung von kaF (siehe die Ausführungen zur geordneten Einführung am Ende dieses Kapitels) können diese Zielkonflikte mildern und eine politische Prioritätensetzung umsetzen.

Weiterführende Fragen zur Vertiefung der Diskussion

- Besteht angesichts der dargestellten Chancen und Risiken der planerische und politische Wille zur Regulierung des automatisierten Fahrens, insbesondere hin zu einer rein kollektiven Nutzung und wer ist die zu regulierende Stelle?
- Welche Entscheidungsgrundlagen (bei bspw. Anfragen für die Einführung von Betriebsgebieten) werden seitens Planung und Politik benötigt?

Forschungsbedarf

- Räumliche Auswirkungen in Gebietstypen abseits der Agglomeration
- Auswirkungen und Wirksamkeit von Regulierung
- (Weiter-) Entwicklung zielgerichteter Regulierungsansätze

a) Welche Rolle sollte und könnte (k)aF in näherer Zukunft in einer Region wie dem RZU-Gebiet spielen?

Die Analysen machen deutlich, dass ein flächendenkender Einsatz von automatisierten Fahrzeugen im RZU-Gebiet kurzfristig, auch aus Gründen teilweise schlechter Befahrbarkeit insbesondere im urbanen Raum eher unrealistisch ist. Gleichwohl ist ein spezifischer Einsatz möglich und kann Mehrwerte bringen. Exemplarisch sei hier die gezielte Verbesserung der Erschliessung von Unternehmensstandorten abseits eines dichten ÖV-Netzes und ausserhalb der üblichen Betriebszeiten genannt. Automatisierte Angebote in einem geeigneten Umfeld können ausgehend von den hier gezeigten Analysen und Ergebnissen entwickelt werden. Darüber hinaus können flexible Angebotsformen aufgrund der stark schwankenden Nachfrage im Freizeitverkehr entsprechend des Wetters oder spezieller Anlässe eine relevante Ergänzung sein - sofern

die jeweils nötigen Kapazitäten bereitgestellt werden können. Bereits durchgeführte Pilotprojekte lassen eine Umsetzung in näherer Zukunft realistisch erscheinen (Mobilitätsarena 2022). Aber diese Verbesserungen müssen mit Bedacht gesetzt und wissenschaftlich begleitet werden. Potenzielle Reboundeffekte reichen von erheblichem Mehrverkehr hin zu einer erheblichen Verschiebung der Standortqualitäten (siehe die Ergebnisse der Erreichbarkeitsanalyse in Kap. 4). Wo auch immer kaF-Betriebsgebiete ausgewiesen werden, ist die Integration des neuen Angebots in das bestehende ÖV-Netz sicherzustellen.

Neben den offensichtlichen (kleineren) Ergänzungen des bestehenden ÖV-Angebotes sind auf der Makroebene klare konzeptionelle Vorstellungen zur Weiterentwicklung des Verkehrsnetzes nötig, um Schlussfolgerungen für die Steuerung von Erreichbarkeitsverbesserungen und die Anwendung von kaF ziehen zu können. Die Handlungsräume des Raumordnungskonzeptes und die Begrenzung des Siedlungsgebiets im kantonalen Richtplan bilden eine verbindliche Grundlage dafür.

Weiterführende Fragen zur Vertiefung der Diskussion

- Welchen Beitrag kann (k)af zur Verbesserung der Erreichbarkeit mit dem ÖV im RZU-Gebiet bringen? Und wo und in welcher Form ist es gewünscht?
- Was kann kaF zur Erreichung der raum- und verkehrsplanerischen Ziele, u.a. entsprechend der kantonalen und regionalen Richtpläne, beitragen?
- Ist der politische und planerische Wille vorhanden, die verkehrliche Regulierung des Angebotes zusammen mit einer weiteren strikten Einhaltung der Richtpläne und Bau- und Zonenordnungen hinsichtlich Begrenzung Siedlungsgebiet und planerischen Dichtezielen umzusetzen?
- Wie kann dieser gezielte Beitrag sichergestellt werden?

Forschungsbedarf

- Konkrete Entwicklung möglicher Angebote von kaF in Ergänzung zum klassischen ÖV und Integration in die bestehende Netz- und Tarifstruktur
- Ermittlung von Potenzialen von kaF zur Attraktivierung des ÖV mit dem Ziel eines entsprechend höheren Anteils im Modal Split

b) Wie unterscheiden sich die aF-Befahrbarkeit und die strassenräumliche Verträglichkeit? Soll die aF-Befahrbarkeit gezielt verbessert werden?

In der Studie wurde die aF-Befahrbarkeit analysiert und damit eingeschätzt wie gut oder schlecht ein Strassenabschnitt aus technisch-infrastruktureller Sicht von einem automatisierten Fahrzeug bewältigbar wäre, unabhängig vom konkreten System (siehe Kapitel 3). Dies ist von der strassenräumlichen Verträglichkeit klar abzugrenzen, die aussagt, ob die vorhandene Nutzung des Strassenraums mit einer zusätzlichen Nutzung durch automatisierte Fahrzeuge und des damit verbundenen Verkehrsaufkommens vereinbar wäre (vgl. Ausführungen zur strassenräumlichen Verträglichkeit in Kap. 5). Im vorliegenden Bericht stellt sich diese Frage beispielsweise für die Gestaltung der Verkehrsdrehscheiben und damit eine intermodale Einbindung von kaF. Möchte man zukünftig eine Verknüpfung des kaF mit dem öffentlichen Verkehr an diesen Orten gewährleisten, müssen die aF-Befahrbarkeit und damit mögliche Anfahrt von Verkehrsdrehscheiben mit kaF mit der strassenräumlichen Verträglichkeit sorgfältig abgewogen werden. Aufgrund der heutigen Gestaltung und Ausrichtung der Bahnhofsbereiche auf Aufenthalt und Umstieg und teilweise reduziertes Vorhandensein von Pkw-Verkehr, (abgesehen von einzelnen Bereichen) sind insbesondere die näheren Bahnhofsumfelder durch eine schlechte aF-Befahrbarkeit gekennzeichnet. Eine gezielte Verbesserung der aF-Befahrbarkeit kann hier unter Berücksichtigung der strassenräumlichen Verträglichkeit sinnvoll sein. (vgl. Kap. 5.2) Für Strassenräume

innerorts muss jedoch weiterhin die Aufenthaltsqualität im Fokus stehen. Die aF-Befahrbarkeit muss sich nach dieser Anforderung richten.

Das Potenzial der Befahrbarkeit durch automatisierte Angebotsformen ist nicht überall nutzbar. Die grösste Verbesserung entsteht bei Nutzung der Autobahn, wobei zwingend auf die Koordination mit zukünftigen ÖV-Massnahmen geachtet werden sollte. Eine Verbesserung der aF-Befahrbarkeit wäre auch durch Anpassung im Strassenraum (z.B. bauliche Trennung von Verkehrsarten) zu erreichen. Eine weitere Möglichkeit ist, digitale Infrastruktur (z.B. Vehicle-to-Infrastructure) einzusetzen, welche die Fahrzeuge bei den Prozessen zur Ausführung der Fahraufgabe unterstützen. In der Schweiz wird davon jedoch voraussichtlich aus Kostengründen abgesehen und es ist unklar, inwieweit digitale Infrastruktur auf die Aufenthaltsqualität im Strassenraum wirkt. Letztendlich liefert die Analyse jedoch eine Grundlage für die Planung darüber, wo tendenziell eher mit dem Einsatz automatisierter Fahrzeuge gerechnet werden kann oder ein Betrieb aus technisch-infrastruktureller Sicht leichter möglich wäre und macht keine Aussagen zu konkreten Verbesserungen.

Weiterführende Fragen zur Vertiefung der Diskussion

- Welche Anforderungen werden aus fachlicher und politischer/gesellschaftlicher Sicht hinsichtlich der strassenräumlichen Verträglichkeit des kaF gestellt und welche Folgen hat dies für die Einführung von kaF?

Forschungsbedarf/offene Fragen

- Was ist nötig, um eine kosteneffiziente Adaptierung der aF-Befahrbarkeit zu erreichen?
- Wie kann die strassenräumliche Verträglichkeit bei der Planung eines Betriebs von kaF berücksichtigt werden und wie wird dies in die Abwägung einbezogen?

c) Welche möglichen Veränderungen ergeben sich im Verkehrsangebot/-netz?

Kollektives automatisiertes Fahren bietet die Chance, das ÖV-Angebot punktuell zu verbessern (s.o.) und mit einer Nutzung von kaF auf der Autobahn eine bestehende Infrastruktur für ergänzende Fahrtbeziehungen zu nutzen. Eine wesentliche Aufgabe bei der Integration in das Verkehrsnetz und in dessen Hierarchie ist die Berücksichtigung der raum- und verkehrsplanerischen Zielsetzungen, um die in Kapitel 6 ausgeführten Chancen einer Verbesserung der Erreichbarkeit zu nutzen und das Risiko einer Attraktivierung planerisch unerwünschter Lagen zu vermeiden. Die Verbesserung der Erreichbarkeit durch kaF wäre auf diese Weise auch substantieller Teil der Güte der ÖV-Erschliessung und müsste entsprechend integriert werden, um eine den Zielen entsprechende Abstimmung von Siedlung und Verkehr zu erreichen.

Für die Nutzung der Autobahn wäre ein Netz an Verkehrsknoten notwendig, dass die Autobahn direkter als heute mit dem bestehenden ÖV-Netz verbindet und so als Verknüpfung zwischen niederrangigen und höherrangigen Netz fungiert. Die Auswirkungen dieses Anwendungsfalls hinsichtlich Erreichbarkeit wären gravierender als kaF nur auf der letzten Meile, sind aber letztendlich auch von einem zu entwickelnden Betriebskonzept und einer geeigneten Integration über (neue) Verkehrsdrehscheiben abhängig. Mögliche neue Verkehrsdrehscheiben, zum Beispiel an Autobahnanschlüssen, sind wenig erforscht. Diese und bestehende Verkehrsdrehscheiben müssten so (weiter-)entwickelt werden, dass

- sie zur Zielerreichung abhängig von Verkehrssystem und Siedlungsentwicklung beitragen,
- geeignete Modi abhängig von der Befahrbarkeit festgelegt werden,
- sie optimal für schnellen und komfortablen Umstieg gestaltet sind und
- städtebaulich und funktional gut eingebettet sind.

Die Integration der Autobahn in das ÖV-Netz wäre bereits heute möglich und wird auf einzelnen Fahrtbeziehungen mittels Buslinien auch genutzt. Jedoch gibt es Einschränkungen:

- Die schwankende Auslastung der Autobahnen erschwert einen zuverlässigen Betrieb einer Buslinie ohne separate Busspuren o.ä.. Auch in der Phase des Mischverkehrs kann man noch nicht von einer höheren Kapazität der Autobahnen und geringeren Überlastungen ausgehen, was mindestens zu Beginn nur einen eingeschränkten Betrieb bedeutet.
- Für die Integration der Autobahnen sind geeignete Umsteigerelationen erforderlich, die neue oder veränderte Verkehrsdrehscheiben bedingen (s.o.). Die Bahnhöfe oder Stadtbahnhaltestellen liegen im RZU-Gebiet nur an einigen Orten in der Nähe von Autobahnauf- bzw. abfahrten, so dass Umwegfahrten nötig sind. Zudem stellt sich auch im Übergang der Autobahnen ins untergeordnete Netz das Risiko der Verkehrsüberlastung und Behinderung der Fahrzeuge.

Weiterführende Fragen zur Vertiefung der Diskussion

- Welche Ergänzungen zum heutigen ÖV-Angebot, insbesondere hinsichtlich der Nutzung der Autobahn, werden angestrebt?
- Strategische Netzplanung für kaF, um Bottlenecks - Netzabschnitte schlechter aF-Befahrbarkeit - zu identifizieren, die für eine Ergänzung der heutigen ÖV-Erschließung relevant sind.
- ÖV-System inkl. der Verkehrsdrehscheiben im Hinblick auf die Einführung von kaF strategisch weiterentwickeln, insbesondere
 - Rückgrat des schienengebundenen ÖVs darauf ausrichten, um Nachfrage zu bündeln.
 - sowohl zeitlich wie auch räumlich bestehende Versorgungslücken identifizieren und Potenziale abwägen.
 - kaF und konventionelle Angebotsformen am richtigen Ort und zur richtigen Zeit im ÖV-System einsetzen.

Forschungsbedarf

- Hierarchie und Struktur aF-Verkehrsdrehscheiben in bestehende ÖV-Struktur integrieren.
- Potenziale der Integration der Autobahn untersuchen (Abwägung der Infrastrukturinvestition mit den Erreichbarkeitspotenzialen).
- Analyse der Personengruppen für die ein verbessertes Angebot geschaffen werden kann und der Lagen, an denen vorhandene ÖV-Kapazitäten besser ausgeschöpft werden können

d) Wie könnten sich Verkehrsdrehscheiben verändern?

Zur Steuerung der Nutzung von automatisiertem Fahren im Hinblick auf die verkehrs- und raumplanerischen Zielsetzungen muss das automatisierte Fahren konzeptionell in das bestehende ÖV-Netz integriert werden. Eine wesentliche Massnahme stellt dazu die Definition bzw. die hierarchische Integration der Verkehrsdrehscheiben dar. Es muss festgelegt werden, an welchen Stellen im Netz bestehende und eventuell nötige neue Verkehrsdrehscheiben in die Netzhierarchie eingebunden werden und welche Verkehrsmittel für welche Distanzen miteinander verknüpft werden müssen (siehe ARE 2021). Dies ist insbesondere anspruchsvoll, da aufgrund der Ergebnisse dieser Studie davon ausgegangen wird, dass die Integration von kaF ins ÖV-Netz mit einzelnen

Betriebsgebieten beginnen wird und eine langsame Durchsetzung zu erwarten ist. Die Dimensionierung von Verkehrsdrehscheiben sollte die potentielle Integration von kaF jedoch bereits frühzeitig berücksichtigen, um sie nicht auf lange Sicht zu verunmöglichen oder stark zu erschweren. An Bahnhöfen wird heute der Fokus stärker auf Velo- und Fussverkehr sowie die Aufenthaltsqualität gelegt, womit die Umgebung weniger auf grosser Verkehrsmengen ausgelegt ist. Insbesondere zu Beginn der Einführung stellt sich die Frage der Abgrenzung bzw. Gleichzeitigkeit des Zugangs mit dem MIV inkl. Park & Ride.

Weiterführende Fragen zur Vertiefung der Diskussion

- An welchen Verkehrsdrehscheiben hat der Umstieg auf kaF eine grössere oder kleinere Bedeutung? Wie kann dies bereits frühzeitig berücksichtigt werden, um spätere Umbauten nicht zu verunmöglichen?
- Welche Einschränkungen werden in der Aufenthaltsqualität und Konflikten mit dem Fuss- und Veloverkehr in Kauf genommen, um die Einbindung von kaF sicherzustellen (siehe auch die Ausführungen zur strassenräumlichen Verträglichkeit)?

Forschungsbedarf

- Wie kann kaF an Verkehrsdrehscheiben eingebunden werden, so dass der Umstieg attraktiv ist?
- Wie kann kaF verträglich für die weiteren Nutzungen im Umfeld an Verkehrsdrehscheiben integriert werden?
- Welche Flächenbedarfe entstehen und wie können diese mit den bestehenden Nutzungen in Einklang gebracht werden?
 - Typologien der Verkehrsdrehscheiben um kaF erweitern (z. B. Tor zur Stadt).
 - aF-Verkehrsdrehscheiben im Rahmen der Integration der Autobahn konzipieren.

e) Welche neuen Möglichkeiten ergeben sich in der Aufteilung des Strassenraums und wie sollen sie genutzt werden?

Im Strassenraum zeigen sich ein Auftreten neuer Flächenbedarfe für kaF, beispielsweise zum Ein- und Ausstieg, und geringere Flächenbedarfe für den klassischen MIV. Zeitlich treten die neuen Flächenbedarfe bereits mit der Ausweisung von entsprechenden Betriebsgebieten auf und erhöhen damit die schon bisher zahlreichen Ansprüche an den öffentlichen Raum, gerade in dichten Gebietstypen und dem Agglomerationsgürtel, weiter, auch wenn von vergleichsweise geringem zusätzlichem Bedarf ausgegangen werden darf. Erst wenn insbesondere Parkierungsflächen im öffentlichen Raum dank einer Reduktion einer individuellen Pkw-Nutzung bei ausreichender Marktdurchdringung oder/und durch begleitende verkehrspolitische Maßnahmen zurückgehen, entstehen neue Möglichkeiten Nutzungen anzuordnen und in Einklang zu bringen. Die Analysen lassen erwarten, dass substanzielle Flächen frei werden können, die jedoch erst sehr spät auch die Fahrbahnbreiten betreffen werden. (siehe Kapitel 5)

Weiterführende Fragen zur Vertiefung der Diskussion

- Welche Prioritäten werden in der Nutzung des öffentlichen Raums angesichts der zusätzlichen Bedarfe durch kaF gesetzt? Wie können die Aufenthaltsqualität und gute Bedingungen für den Fuss- und Veloverkehr erhalten bleiben und verbessert werden?
- Wie können Parkierungsflächen heute gestaltet werden, damit sie bei geringerem Bedarf flexibel umgenutzt werden können? Welche Anforderungen werden gestellt?
- Welche Ziele für die Gestaltung des öffentlichen Raums werden mit der Nutzung von (k)aF verbunden?

Forschungsbedarf

- Bestimmung nötiger zusätzliche Flächenbedarfe für eine gute Organisation von kaF
- Abschätzung der nötigen Marktdurchdringung von kaF bis Parkierungsflächen freiwerden

f) Welche Veränderungen sind über den Strassenraum hinaus im Bereich der Flächen zu erwarten? Entstehen neue Flächenbedarfe oder werden durch kaF Flächen für andere Nutzungen frei?

Die Analysen zu den Pkw-assozierten Flächen ergaben ein grosses Potenzial für die Innenentwicklung, das aufgrund der nötigen Marktdurchdringung durch kaF (vgl. Kap. 5) jedoch erst mittel- bis langfristig zur Verfügung stehen wird. Darüber hinaus ist die Aktivierung der Transformationsflächen entsprechend der bisherigen Erfahrungen bei der Umsetzung der Innenentwicklung, insbesondere im Bestand, eine anspruchsvolle Aufgabe, die ein neues Planungsverständnis bedingt. Zusätzlich konzentrieren sich die Transformationsflächen auf der Mikro-Ebene an den Einfallsachsen, an denen aufgrund der starken Umweltgesetzgebung Entwicklungen zusätzlich erschwert sind.

Auf der Ebene des Strassenraums und in der Flächenentwicklung sind eine vorausschauende Organisation und Abstimmung des zukünftigen Bedarfes und potenziell freiwerdender Flächen angebracht. Die sich teilweise widersprechenden Zielsetzungen der Raum- und Verkehrsplanung müssen auf geeigneten planerischen Grundlagen sorgfältig gegeneinander abgewogen werden. Zudem ist es nötig, die Folgen der Betriebsformen von kaF abschätzen zu können. Neben dem Flächenbedarf betrifft dies auch die verkehrlichen Auswirkungen im (lokalen) Verkehrsnetz. Bei der Flächendynamik ist zu berücksichtigen, dass die zusätzlichen Flächen früher benötigt werden, als dass Flächen frei werden. Die Berechnungen im Kapitel 5 ergeben zwar zusätzlichen Flächenbedarf für kaF in aF-Betriebsgebieten, aber in vergleichsweise geringem Umfang.

In Kap. 5 zu den veränderten Flächenbedarfen wurde ausführlich dargelegt, mit welchen räumlichen Auswirkungen in puncto Flächen zu rechnen ist. Abb. 70 zeigt diese Wechselwirkung zwischen der Erreichbarkeitsveränderung (im Projekt bezogen auf die Veränderung durch kaF) und der baulichen Dichte der Flächen auf. Bei einer guten aF-Befahrbarkeit und gleichzeitigen Defiziten in der ÖV-Erschliessung konnte eine grosse potenzielle Verbesserung der Erreichbarkeit nachgewiesen werden. Befinden sich an diesen Lagen ebenfalls Transformationsflächen bzw. auch andere Baulandreserven, können dort Aktivierungen der Flächennutzung vorgenommen werden. Im Gegensatz dazu würde an Orten mit geringer Erreichbarkeitsverbesserung und gleichzeitig geringem Anteil von Transformationsflächen keine Dynamik der Flächennutzung ausgelöst. Insbesondere trifft dies auf Orte zu, an denen neben der schlechten aF-Befahrbarkeit auch eine eingeschränkte Strassenraumverträglichkeit von aF gegeben ist. Im RZU-Gebiet zeigt die Analyse (vgl. Abb. 57Abb. 58) den Agglomerationsgürtel als Gebiet, in dem eine aF-Befahrbarkeit gegeben ist und Betriebsgebiete ausgewiesen werden können. Gleichzeitig können dort auch Pkw-assozierte Flächen mittel- bis langfristig umgenutzt werden. In diesen Lagen würde ebenfalls der Bedarf nach zusätzlichen bzw. neukonzipierten Verkehrsdrehscheiben entstehen.

Weiterführende Fragen zur Vertiefung der Diskussion

- Wie können die zusätzlichen Flächenbedarfe antizipiert und in der Regulierung den Zielen entsprechend gesteuert werden?
- Sollen Flächen gezielt aktiviert werden?

Forschungsbedarf

- Detaillierte Kenntnisse über eine potenzielle Reihenfolge bzw. Wahrscheinlichkeit freiwerdender Flächen

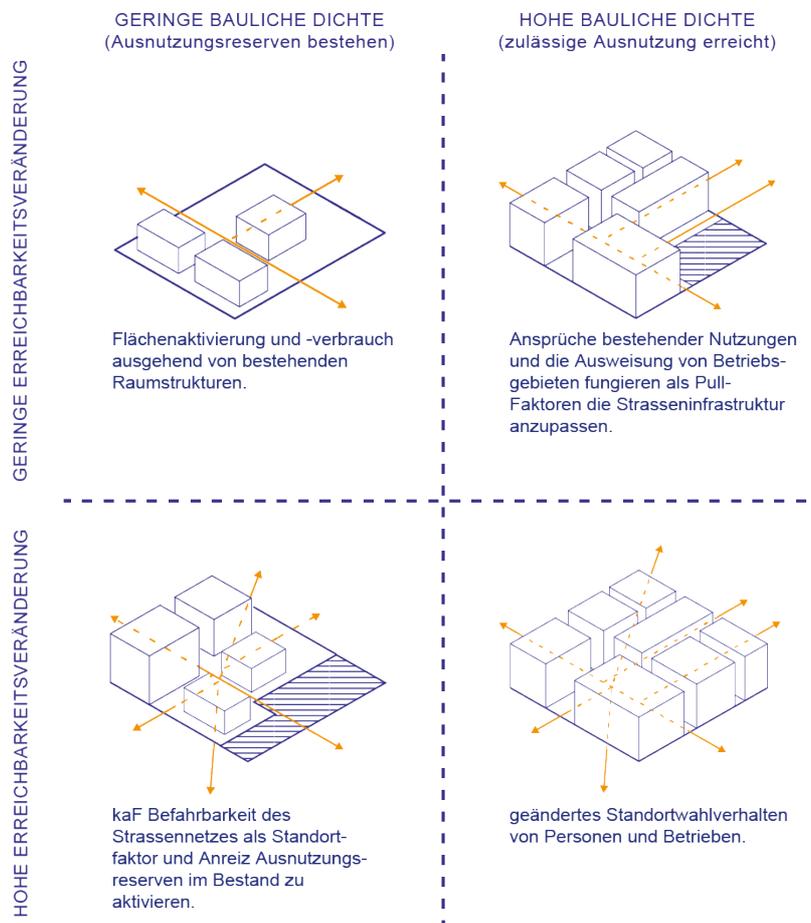


Abb. 70 Zusammenhang Flächennutzung und Erreichbarkeitsveränderung (eigene Darstellung adaptiert von Kasraian et al. 2016)

g) Wie kann die Ausgestaltung von aF-Betriebsgebieten diskutiert werden und wie kann ein geeigneter Planungsprozess aussehen?

Sowohl aufgrund der Ergebnisse der aF-Befahrbarkeitsanalyse als auch aus der Tendenz zur Zulassung von aF-Betriebsgebieten in Europa/Deutschland (siehe anschliessende Vertiefung) wird davon ausgegangen, dass sich auch in der Schweiz die Frage nach der Auswahl möglicher Betriebsgebiete und deren Gestaltung in absehbarer Zeit stellen wird. Alle zuvor in diesem Kapitel gestellten Fragen und Diskussionsansätze sind dabei relevant. Insbesondere im Gebietstyp «Industrie-/Gewerbegebiete mit Autobahnanschluss» sind aufgrund der relativ guten aF-Befahrbarkeit gute Bedingungen für entsprechende Angebote vorhanden. Gleichzeitig sind hier mit Unternehmen und den spezifischen Mobilitätsbedarfen von Pendlern relevante Zielgruppen zu finden. Die in den Analysen sichtbare Verbesserung der ÖV-Erreichbarkeit in den peripheren Lagen und am Siedlungsrand kann beispielsweise gezielt im Freizeitverkehr genutzt werden.

Weiterführende Fragen zur Vertiefung der Diskussion

- Für welche Anwendungen und Verbesserungen der Erreichbarkeit ist die Ausweisung eines Betriebsgebiets angemessen und zielführend?
- Welche Zielkonflikte entstehen durch diese aF-Betriebsgebiete?

Forschungsbedarf

Umsetzung eines Realexperiments potenzieller Betriebsgebiete, um umfassend bekannte und unbekannte gesellschaftliche, ökologische, ökonomische Wirkungen und Nebenwirkungen zu erfassen.

- Strukturen und Prozesse für die Umsetzung in Verwaltung und Politik aufbauen.
- Eignung von aF-Betriebsgebieten diskutieren und festlegen (in Abstimmung mit den raumplanerischen Zielsetzungen).
- Kriterien und Qualitäten zur Ausgestaltung des Angebots definieren und verhandeln, z.B. Anzahl, Lage und Grösse von aF-Depots und (Vor-)Halteflächen.
- Forschungsdesign und -infrastruktur für nötiges, breites Monitoring und Evaluierung hinsichtlich der Auswirkungen auf Raum, Verkehr, Umwelt, Gesellschaft mit dem Fokus Reboundeffekte entwickeln.
- Zivilgesellschaft einbinden (Partizipation in Planungsprozessen, Initiativen unterstützen, Testläufe ermöglichen).
- Regulierungsoptionen entwickeln.

7.3 Vertiefung: geordnete Einführung durch aF über die Festlegung von aF-Betriebsgebieten

International werden heute bereits aF-Betriebsgebiete ausgewiesen. Diese Studie macht deutlich, dass neben der technologischen Machbarkeit (die hier über die aF-Befahrbarkeit abgebildet wurde) auch weitere Faktoren berücksichtigt werden müssen, um die Erreichung raum- und verkehrsplanerischer Zielsetzungen sicherstellen zu können. Es muss darum gehen tatsächliche, aktuell weniger oder schlecht adressierte, Mobilitätsbedürfnisse zu adressieren. Zudem muss die Verträglichkeit im Strassenraum sichergestellt werden. Hier ist eine sorgfältige Abwägung der Auswirkungen zwingend. Für die nötige Ausweisung von Depotstandorte sind erhöhte Anforderung entsprechend der Vorgaben für stark verkehrserzeugende Nutzungen zu erwarten.

Die Analyse zur aF-Befahrbarkeit zeigt auf, wo das Strassennetz des RZU-Gebiets nach heutigem Stand aus technologischer Sicht eher schlecht befahrbar ist. Teilweise ergeben sich hier sogenannte Level-4-Inseln, in denen Angebotsformen entwickelt werden können (Soteropoulos et al. 2021). Eine Ausscheidung von aF-Betriebsgebieten statt genereller Zulassung automatisierter Fahrzeuge ist der Schritt, der innerhalb der EU gegangen wird und mit dem Ziel einer geordneten Einführung ein auch für die Schweiz sinnvoller Weg sein kann. Neben der technologischen Machbarkeit werden so auch Mobilitätsdienstleistungen incentiviert.

Die Europäische Kommission hat mit der Ende August in Kraft getretenen Durchführungsverordnung 2022/1426 Vorschriften für die Zulassung von automatisierten Fahrsystemen und damit die rechtlichen Voraussetzungen für den Einsatz von hochautomatisierten Fahrzeugen geschaffen (vgl. Europäische Kommission 2022). Dieser Rechtsrahmen mit konkreten technischen Spezifikationen schafft für alle Beteiligten Klarheit über die Anforderungen zur Markteinführung und Zulassung vollautomatisierter Fahrzeuge. Die jetzt gültige Regelung ermöglicht die Zulassung von Kleinserien (1500 Einheiten pro Jahr in der gesamten EU bzw. maximal 250 auf nationaler Ebene). Dabei zielt die EU vor allem auf letzte Meile Verkehre und Robotaxis ab. Die Zulassung der Fahrzeuge ist jedoch nur ein Aspekt in der zukünftigen konkreten Ausgestaltung des Betriebs dieser Fahrzeuge. So gewährt die EU-Durchführungsverordnung einen nationalen Gestaltungsspielraum hinsichtlich des Betriebs von Fahrzeugen, insbesondere bezüglich der Festlegungen von bestimmten aF-Betriebsgebieten sowie –zeiten. Die technologische aF-Befahrbarkeit sollte aufgrund der zuvor formulierten Chancen und Risiken jedoch nicht allein zur Entscheidung für eine generelle Zulassung oder/und ein aF-Betriebsgebiet für

automatisiertes Fahren führen, sondern der Beitrag von aF zur Erreichung der verkehrlichen und räumlichen Zielsetzungen bei der Entscheidung einbezogen werden.

In Zukunft werden die nationalen sowie lokalen Behörden also vermutlich auch in der Schweiz verstärkt damit konfrontiert werden, dass Anbieter bzw. Betreiber von automatisierten Level 4-Fahrzeugen in bestimmten Gebieten ihren Fahrbetrieb betreiben möchten. Auch für die in der Studie beschriebenen kollektiven Angebotsformen gilt es dabei aF-Betriebsgebiete gezielt von tatsächlichen Mobilitätsbedürfnissen ausgehend und in Übereinstimmung mit bestehenden raum- und verkehrspolitischen Zielsetzungen zu planen. Eine solche Festlegung von aF-Betriebsgebieten sollte dabei nicht nur in den Händen der Betreiber selbst liegen, sondern die entsprechenden Verantwortlichen auf Bundes-, Kantons- und Gemeindeebene. In den Themen Raum- und Verkehrsplanung (insbesondere ÖV) müssen hier mit dem Ziel einer geordneten Einführung automatisierten Fahrens Vorgaben gemacht werden. Es benötigt jedoch für die Überprüfung der von den Betreibern vorgeschlagenen aF-Betriebsgebiete letztendlich aus planerischer Sicht bei den lokalen Entscheidungsträgern entsprechendes Know-How darüber, wo ein solcher Service einen wichtigen Beitrag für bestehende Verkehrs- und Mobilitätsziele leisten kann. Bei der Festlegung von aF-Betriebsgebieten für Level 4-Fahrzeuge muss also evidenzbasiert vorgegangen werden und die Wirkungen auf Verkehr und Raum berücksichtigt werden. Wo sind aF-Betriebsgebiete sowohl aus technischer und wirtschaftlicher Sicht für den Betreiber möglich, machen jedoch auch hinsichtlich des Beitrags im Sinne einer Ergänzung des öffentlichen Verkehrs Sinn? Nur so könnte diese Technologie zu einer nachhaltigen Transformation des Mobilitätssystems beitragen. Da aber selbst dieser Weg zahlreiche Unklarheiten einschließt, braucht es eine begleitende Betrachtung der entstehenden verkehrlichen und räumlichen Wirkungen.

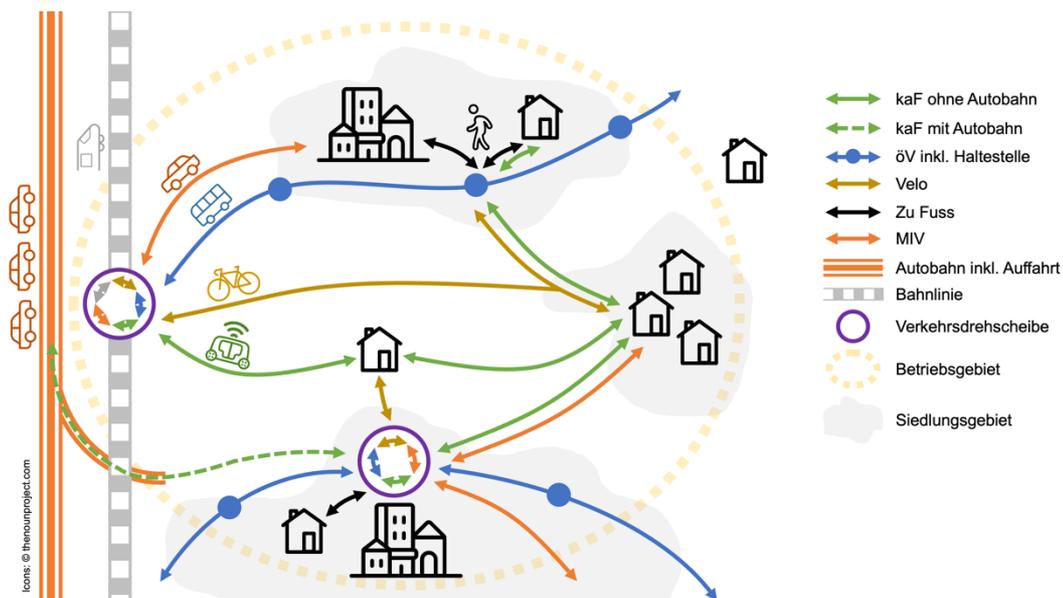


Abb. 71 Angebotsformen und aF-Betriebsgebiet

Der in der vorliegenden Studie verwendete Ansatz untersucht und bewertet anhand des RZU-Gebiets einerseits die technisch-infrastrukturelle Eignung des Strassennetzes, nutzt andererseits diese Eignung jedoch auch als Grundlage für die Analyse der Veränderung der Erreichbarkeit durch den Einsatz automatisierter Fahrzeuge auf der letzten Meile zum öffentlichen Verkehr sowie auf der Autobahn. Dieses Vorgehen ermöglicht Erkenntnisse darüber, in welchen Gebieten bei solchen Einsatzformen automatisierter Fahrzeuge die grössten Erreichbarkeitsgewinne erzielt werden können und wo die meisten Menschen davon profitieren können. Eine solche Analyse bietet somit eine erste Entscheidungsgrundlage für die Festsetzung und Planung von aF-Betriebsgebieten für Level 4-Fahrzeuge, die in das derzeitige öffentliche Verkehrssystem eingebettet sind und durch die ein Beitrag im Sinne verkehrs- und raumpolitischer Ziele erreicht werden kann.

Konkret bieten die bivariaten Karten «Erreichbarkeitsverbesserung x Bevölkerungs- und Beschäftigtendichte» erste Erkenntnisse zu möglichen aF-Betriebsgebieten, da in Gebieten geringerer Dichte die Erreichbarkeit nicht verbessert werden sollte. Zudem sollten Gebiete ausgewählt werden, in denen durch automatisiertes Fahren eine Verbesserung der Erreichbarkeit erreicht werden kann und nicht allein eine zusätzliche, in einzelnen Aspekten komfortablere Angebotsform installiert wird (Weber 2022). Um die Gebiete herauszufiltern, für die planerisch eine zusätzliche Attraktivierung interessant ist, wurden die heutigen Dichten an Bevölkerung und Beschäftigten (nach Quartieranalyse) mit den Zieldichten der Regionen im RZU-Gebiet für 2030 entsprechend der regionalen Richtpläne verglichen (regionale Richtpläne der RZU-Regionen). Abb. 72 (folgende Seite) zeigt die Quartiere, in denen die heutige Dichte hinter den Zieldichten zurückliegt. In diesen Gebieten kann eine Verbesserung der Erreichbarkeit einen relevanten Beitrag zur Erreichung der anvisierten Dichten bei gleichzeitiger Verschiebung des Modal Split zum ÖV leisten.

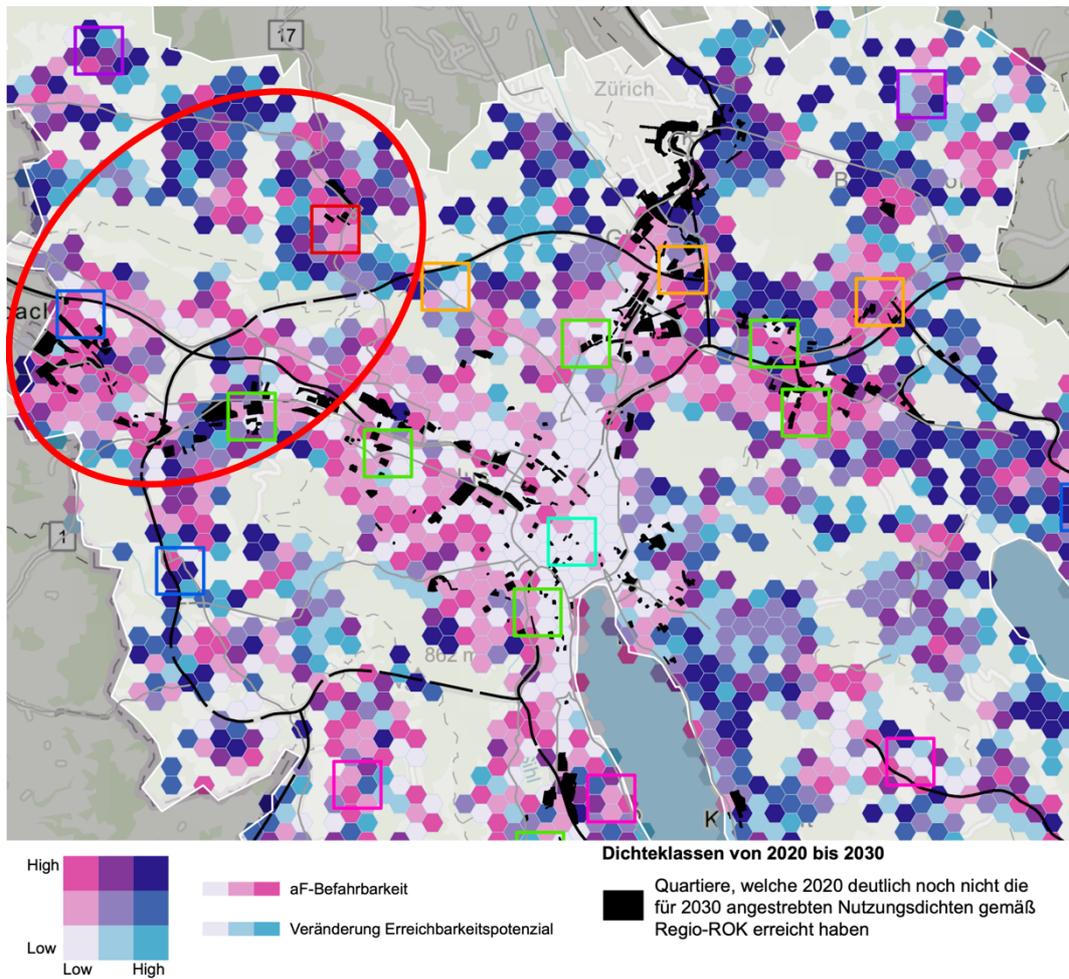


Abb. 72 Bivariate Darstellung aF-Befahrbarkeit und Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials, Variante «kaF-letzte Meile ohne Autobahn», mit Darstellung der Quartiere, welche 2020 deutlich noch nicht die für 2030 angestrebten Nutzungsdichten gemäss Regio-ROK erreicht haben (schwarze Flächen, mit Beispiel Schlieren-Urdorf hervorgehoben)

Diese Analyse gibt erste Hinweise, welche Gebiete sich für eine weitere Vertiefung lohnen könnten (vgl. Abb. 72). Ausgehend von den Analysen und Annahmen gibt es nur vereinzelt Gebiete, in denen die angestrebte Verdichtung mit einer Erreichbarkeitsverbesserung durch kaF zusammentrifft. Sowohl die Dichteverhältnisse als auch die Defizite in der ÖV-Erschliessung müssen, um Entscheidungen adäquat zu fundieren, detaillierter untersucht werden, so dass für Betreiber automatisierter Angebotsformen klare Vorgaben für die Ausgestaltung des Betriebes gemacht werden können und auch mehrere Betreiber optimal

gesteuert werden könnten. Neben einer klar auf Angebotsseite regulierten Verbesserung der Erreichbarkeit kann auch eine zeitliche Ergänzung des Angebots ausserhalb der Betriebszeiten den Einsatz automatisierter Angebotsformen rechtfertigen. Relevant ist, dass tatsächliche und nicht oder nur schlecht befriedigte Mobilitätsbedürfnisse ermittelt werden. Ebenso muss die Klimabilanz automatisierter Angebotsformen laufend untersucht werden.

Am Beispiel Schlieren-Urdorf werden weitere nötige Überlegungen exemplarisch genannt:

- Wo gibt es konkrete nicht befriedigte Mobilitätsbedarfe (räumlich und zeitlich)?
- Wo liegen ausreichende Erreichbarkeitspotenziale für das Angebot?
- Gibt es Points of Interest die berücksichtigt werden müssen?
- Wie wahrscheinlich ist eine Konkurrenzierung vs. Ergänzung des ÖV bzw. Fuss und Velo?
- Ist eine betriebswirtschaftlich und betrieblich geeignete Abgrenzung möglich?
- Welche Vorgaben sind für den Betrieb nötig, die die benötigten Flächen und ihre Lage beeinflussen? Wie können neue und wegfallende Flächenbedarfe koordiniert werden?
- Wie können die nötigen Depots flächensparsam angeordnet und städtebaulich gut integriert werden?
- Kann das Angebot tariflich im Verbundangebot integriert werden?
- Ist eine Überarbeitung der Abstimmung Raumplanung – ÖV und der Weiterentwicklung der ÖV-Güteklassen nötig/sinnvoll?

Nach einer ersten Festlegung von Level 4-Betriebsgebieten müssen diese während des Betriebes auf verkehrliche, räumliche, gesellschaftliche und ökologische Wirkungen untersucht werden. Die zuvor aufgezeigten möglichen Erreichbarkeitsgewinne können eine Reihe von intendierten und nicht-intendierten Effekten auslösen, auf die frühzeitig reagiert werden sollte. Die Beobachtung der Effekte ist aus folgenden Gründen besonders relevant:

- Mit den Angebotsformen von kaF wird begonnen, ein neues Verkehrsmittel zu implementieren, welches nach den Erfahrungen mit der Einführung von Eisenbahn und Auto einen Raum strukturell grundlegend verändern kann. Es ist nötig diese Veränderungen hinsichtlich der Zielsetzungen zu steuern.
- Die Attraktivitätssteigerung durch eine bessere Erreichbarkeit kann zu einem unintendierten Siedlungswachstum in peripheren Lagen und ausserhalb des Siedlungsgebiets führen und bestehende Zentrenstrukturen könnten geschwächt werden.
- Bei der Implementierung neuer Technologien ist auch mit unvorhersehbaren Auswirkungen und Reboundeffekten zu rechnen.

Nur bei einem umfassenden Monitoring dieser Effekte kann die Regulierung entsprechend angepasst werden. Die bisherigen in der Schweiz durchgeführten Studien haben in diesem Aspekt bereits Vorarbeiten geleistet, die mit den Erkenntnissen dieses Berichtes angereichert werden können.

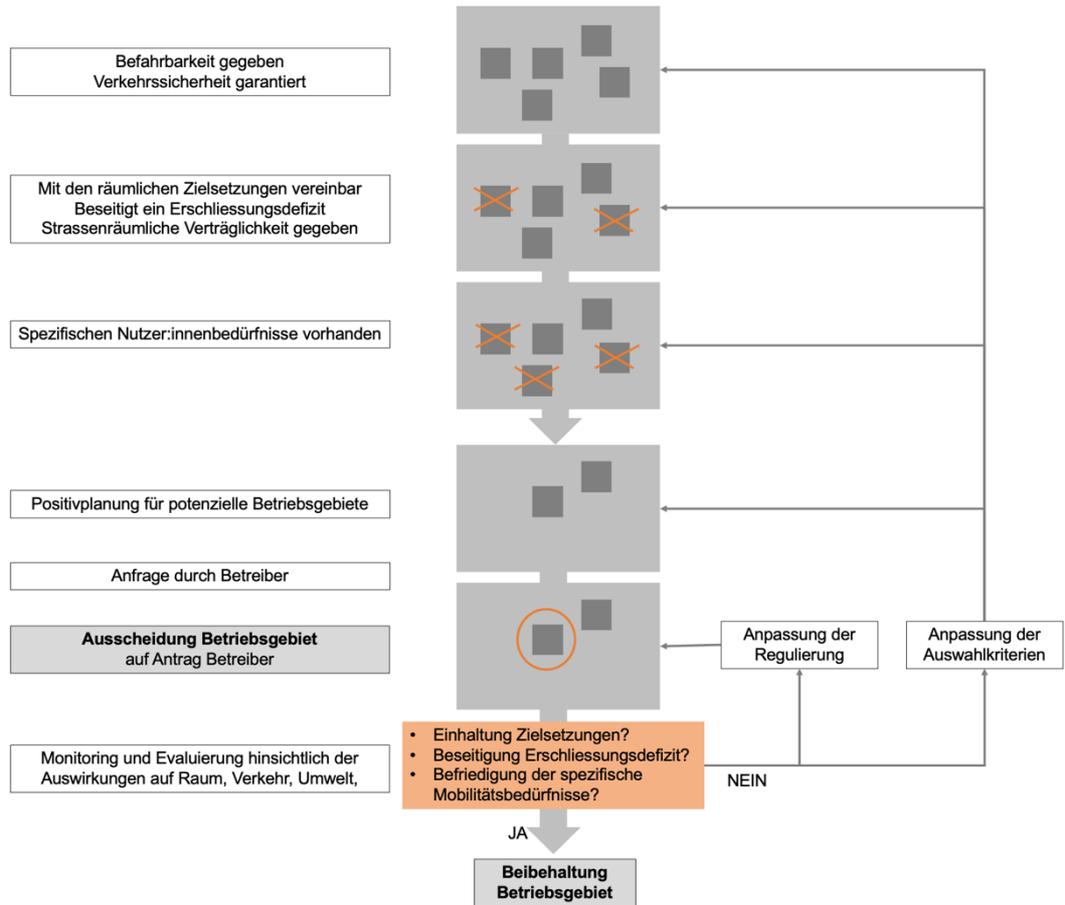


Abb. 73 Idealtypischer Planungsprozess von aF-Betriebsgebieten

8 Fazit

8.1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht will einen Beitrag zur Beantwortung der Frage leisten, wo Betriebsgebiete für kollektiv-genutzte automatisierte Fahrzeuge sinnvollerweise eingerichtet werden können und nach welchen Kriterien diese Wahl getroffen werden kann. Am Fallbeispiel des RZU-Gebiets, das sich aus kernstädtischen, suburbanen und ländlichen Teilräumen zusammensetzt, wurde hierfür zunächst die Befahrbarkeit des Strassenverkehrsnetzes aus technischer Sicht für automatisierte Fahrzeuge bewertet. Von dieser prinzipiellen Machbarkeit ausgehend, wurde untersucht, wo der Einsatz kollektiver Angebotsformen automatisierten Fahrens (kaF) zu einer Verbesserung der Erreichbarkeit im Personenverkehr führen kann. Für die Berechnung der Erreichbarkeit, wurden zwei Angebotsformen kollektiven automatisierten Fahrens in Ergänzung zum bestehenden ÖV-System betrachtet. Diese Ergebnisse der Erreichbarkeitsanalyse wurden vor dem Hintergrund der raum- und verkehrsplanerischen Zielsetzungen bewertet und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Durch die Analyse der Befahrbarkeit wurde deutlich, dass das RZU-Gebiet hinsichtlich des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge keinen homogenen Raum darstellt, sondern das Strassennetz aus technisch-infrastruktureller Sicht ganz unterschiedliche Anforderungen an automatisierte Fahrsysteme stellt. Speziell Bereiche in Industriegebieten und an den Stadträndern traten in dieser Analyse durch besonders gute Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge hervor. Die Befahrbarkeit des Strassennetzes im Zentrum und großen Teilen der Stadt Zürich, in mittleren Städte sowie anderen Siedlungskernen auch in peripheren Lagen ist im Gegensatz dazu tendenziell schlecht (vgl. auch Ergebnis und Fazit in Kapitel 3).

Um die Veränderung der Erreichbarkeit durch kollektive Angebotsformen des automatisierten Fahrens festzustellen, wurden Erreichbarkeitsanalysen durchgeführt und Erreichbarkeitspotenziale berechnet. Diese Berechnung wurde für das bestehende Verkehrsangebot und eine Erweiterung des öffentlichen Verkehrs durch ein kollektives automatisiertes Angebot auf der letzten Meile, wo dies die Befahrbarkeit zulässt, durchgeführt. Einige Teilräume würden besonders von einer verbesserten Erreichbarkeit durch das zusätzliche Angebot profitieren: tendenziell Randlagen der urbanen Gebiete (am Saum des jeweiligen Siedlungskörpers mit vergleichsweise geringer Nutzungsdichte und grosszügigen Strassenräumen), Gebiete mit Bahnanschluss (vor allem in peripheren Lagen) und die Umgebung von Zentren der Klein- und Mittelstädte. Als Ergänzung wurde eine Variante berechnet, bei der automatisierte Fahrzeuge neben der letzten Meile auch auf Autobahnen unterwegs sein können. Hier profitiert das Umfeld der Autobahnabfahrten, insbesondere Gebiete im Agglomerationsgürtel im Norden und Westen der Stadt Zürich. Zwischenräume, die weder an der Autobahn liegen noch über einen Bahnanschluss verfügen, sowie die Stadt Zürich selbst profitieren in beiden Szenarien kaum bis gar nicht (vgl. auch Ergebnis und Fazit in Kapitel 4).

Wie neue Verkehrsmittel in der Vergangenheit, werden automatisierte Fahrzeuge neben verkehrlichen auch räumliche Wirkungen auslösen. Um auch diesen Aspekt in der Betrachtung kollektiver Angebotsformen zu berücksichtigen, wurden veränderte Flächenbedarfe, auf Grund einer schlechten Datenlage genähert, quantifiziert. Diese erste Näherung zeigt große, langfristig entstehende Umnutzungspotenziale in der Grössenordnung von 0,5 bzw. 5 km². Neue Flächenbedarfe hingegen entstehen bereits kurzfristig, um das neue Angebot in das bestehende zu integrieren. Im Fall von kollektiven Angebotsformen sind dies Flächen für Depots der Fahrzeuge, Vorhalte- bzw. Parkplatzflächen und vor allem an den Verkehrsdrehscheiben. Ein wesentlicher Aspekt der Veränderung der Flächenbedarfe ist die Ungleichzeitigkeit: neue, moderate Bedarfe entstehen in aF-Betriebsgebieten kurzfristig, während die Parkierungsflächen und Pkw-assoziierten Betriebe durch die Einführung kollektiven automatisierten Fahrens erst langfristig freigesetzt werden. Trotzdem stellen diese Potentialflächen eine relevante

Größe im Kontext einer Innenentwicklung dar, die zu einer tatsächlichen Neuausrichtung des Siedlungsraums im Agglomerationsgürtel genutzt werden könnte (vgl. auch Ergebnis und Fazit in Kapitel 5).

Bei der Gegenüberstellung der Analyseergebnisse mit den raum- und verkehrsplanerischen Zielsetzungen aller Staatsebenen wurden Chancen für die Erreichung letzterer aber gleichzeitig auch zahlreiche Risiken deutlich. (vgl. Kapitel 6):

- Betrachtet man die Verbesserung der Erreichbarkeit durch kollektive Angebotsformen des automatisierten Fahrens zusammen mit der planerisch angestrebten Dichte von Bevölkerung und Beschäftigten zeigen sich Orte, für die eine Verbesserung wünschbar sein kann. Diese oder ähnliche Analysen sind wertvoll um potenzielle Betriebsgebiete für kaF in wahrscheinlich naher Zukunft gezielt planen zu können.
- Auch mit kollektiver Nutzung ist ohne zielgerichtete Regulierung des Angebotes eine Erreichbarkeitsverbesserung in peripheren Lagen und ausserhalb des Siedlungsgebietes zu erwarten.
- Die Nutzung der Autobahn verbessert die Erreichbarkeit deutlich, jedoch im RZU-Gebiet insbesondere auch in Lagen, für die dies planerisch nicht gewünscht ist. Zudem bedingt die Nutzung der Autobahn durch kollektives automatisiertes Fahren eine betriebliche und infrastrukturelle Integration in das ÖV-System, die einer umfassenden Planung bedarf und erst mittel- bis langfristig möglich ist.
- Mit der Einführung von kollektivem automatisiertem Fahren ergeben sich kurzfristig neue Flächenbedarfe, langfristig werden Flächen für Pkw-assozierte Nutzungen und insbesondere Parkierungsflächen frei werden.

Um die Chancen einer Ergänzung des Verkehrssystems durch Angebote kollektiven automatisierten Fahrens zu nutzen und gleichzeitig den Risiken zu begegnen, ist eine Regulierung des Angebots zwingend. Aufgrund der bisher geringen Erfahrungen mit (kollektiven) automatisierten Angeboten und den mit ihrer Einführung verbundenen Unsicherheiten wurden folgende Fragenkomplexe zur Vertiefung ermittelt (vgl. Kapitel 7):

- Welche Rolle sollte und könnte (kollektives) automatisiertes Fahren in näherer Zukunft in einer Region wie dem RZU-Gebiet spielen?
- Wie unterscheiden sich die Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge und deren strassenräumliche Verträglichkeit? Soll diese Befahrbarkeit gezielt verbessert werden?
- Welche möglichen Veränderungen ergeben sich im Verkehrsangebot/-netz?
- Wie könnten sich Verkehrsdrehscheiben verändern?
- Welche Möglichkeiten ergeben sich zur Neuverteilung des Strassenraums und wie sollen sie genutzt werden?
- Welche Veränderungen sind über den Strassenraum hinaus im Bereich der Flächen zu erwarten? Entstehen neue Flächenbedarfe oder werden durch kollektives automatisiertes Fahren Flächen für andere Nutzungen frei?
- Wie kann die Ausgestaltung von Betriebsgebieten für automatisiertes Fahren diskutiert werden und wie kann ein geeigneter Planungsprozess aussehen?

Aus der Sicht des Projektteams ist der erste und wichtigste Schritt um bei der Einführung von kollektiven automatisierten Angebotsformen Chancen zu nutzen und Risiken zu begegnen, das evidenzbasierte Planen von Betriebsgebieten für automatisiertes Fahren. Diese Planung nimmt in der Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge ihren Ausgang, schließt aber notwendigerweise planerische Fragestellungen mit ein. Diese sind u.a. Fragen wie Wem kommt dieses Angebot zu gute? Oder Wo bestehen aktuell tatsächliche Mobilitätsbedarfe, die mit dieser Technologie befriedigt werden können? Da selbst bei diesem Vorgehen, die Einführung des automatisierten Fahrens mit nicht-abschätzbaren Unsicherheiten behaftet bleibt, wird nach einem ersten Realexperiment zur konkreten Behandlung obiger Fragenkomplexe weiterhin eine begleitende Evaluierung ausgewiesener Betriebsgebiete für automatisiertes Fahren

empfohlen, um möglichen Rebounds und anderen verkehrlichen, räumlichen, sozio-ökonomischen und vor allem auch Umwelteffekten frühzeitig begegnen zu können.

8.2 Relevanz und Übertragbarkeit der Ergebnisse

Methodische Übertragbarkeit

Die verwendeten methodischen Ansätze wurden so gewählt, dass sie gut auf andere Untersuchungsgebiete anwendbar sind. So lassen sich die GIS-Analysen für ebenjene Räume, die vergleichbare Datenlage aufweisen, übernehmen. Damit liefert das Forschungsprojekt nicht ausschliesslich dem RZU-Gebiet Wissenserkennntnis, sondern jeglichen anderen Regionen der Schweiz, die an einer Übertragbarkeit interessiert sind.

Inhaltliche Übertragbarkeit

Die inhaltlichen Erkenntnisse decken sich mit dem internationalen Forschungsstand. Die Struktur der Verbesserung der Erreichbarkeit ausserhalb der Zentren zeigt sich im RZU-Gebiet stabil und ist für weitere Gebiete in der Schweiz erwartbar. Allerdings sind die Ergebnisse ohne zusätzliche Analysen nicht in ländlichere Gebiete der Schweiz übertragbar, ausserdem müssen besondere topographische und wetterabhängige Bedingungen separat analysiert werden.

Weitere Vertiefung des Themas

Die in der Studie durchgeführten Analysen sind eine Basis eine fundiertere Diskussion insbesondere der raum- und verkehrsplanerischen Auswirkungen führen zu können. Die Auseinandersetzung mit den obigen Fragestellungen und Handlungsbedarfen wurde darum erst begonnen. Die RZU wird diese Frage innerhalb der Gremien ihres Verbandes, insbesondere auf Ebene des RZU-Vorstandes und auch mit einzelnen Mitgliedern, wie beispielsweise dem Tiefbauamt und den Verkehrsbetrieben der Stadt Zürich sowie dem Amt für Mobilität des Kantons Zürich weiterführen. Darüber hinaus hat die Geschäftsstelle der RZU bereits die weitere Verbreitung und Diskussion der Ergebnisse mit dem Schweizerischen Städteverband/der Städtekonzferenz Mobilität, espace suisse und im Austausch der RZU mit den Metropolregionen Basel, Bern und Genf aufgegleist. Zudem ist eine Präsentation der Ergebnisse an der Mobilitätskonferenz des ARE im August 2023 geplant. Die RZU wird diese Diskussionen in geeigneter Form dokumentieren und hofft, damit zu einer Vertiefung der Fragestellungen mit relevanten Stakeholdern in der Schweiz beitragen zu können.

8.3 Weiterer Forschungsbedarf

Im Laufe der Bearbeitung fiel an diversen Stellen weiterer Forschungsbedarf auf, der sich zum einen während der Bearbeitung im Sinne offener Fragen oder fehlender Datengrundlagen zeigte. Zum anderen ergaben sich nach Abschluss der Analysen und in der Diskussion der Ergebnisse weitere Fragen, die vertiefend und im Anschluss mittels Forschung beantwortet werden sollten. Der Forschungsbedarf leitet sich dabei aus den Analysekapiteln 3-5 und den weiteren Überlegungen in Kapitel 7 ab und wird im Anschluss zusammengefasst dargestellt.

Forschungsbedarf aus der aF-Befahrbarkeitsanalyse (siehe Kap. 3)

- Die durchgeführte Analyse und Bewertung der Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge stellen nur einen ersten Ansatz für die Bewertung dar, der in zukünftigen Studien weiterentwickelt werden müsste: Um die Genauigkeit der Bewertung zu erhöhen, wäre der Einbezug von weiteren Datenquellen wie insbesondere HD Maps, Datensätzen von Herstellern und Echtzeitinformationen, insbesondere zum Vorhandensein dynamischer Objekte sowie Verkehrs- und Wetterbedingungen von wichtig.

- Die Berücksichtigung der letztgenannten Echtzeitdaten würde zudem zu einer Bewertung der Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge führen, die sich in Echtzeit, z.B. bei einem Wechsel der Wetterbedingungen, verändern. In Zukunft könnte so eine dynamische bzw. auch tageszeitliche Abbildung der Befahrbarkeit vorgenommen werden, um prinzipielle Unterschiede im Tagesverlauf (z.B. schlechtere Befahrbarkeit bzw. komplexere Bedingungen bei Strassen in der Nähe von Schulen insbesondere bei Beginn und Ende des Unterrichts) aufzuzeigen. Dies könnte dabei helfen, nicht nur mögliche aF-Betriebsgebiete, sondern auch mögliche Betriebszeiten von automatisierten Fahrzeugen (so wie dies beispielsweise schon heute bei den Robotaxis von Cruise in San Francisco, die bislang allein in der Nacht verkehren, gemacht wird) zu diskutieren und festzulegen (vgl. Hope 2022).
- Zudem sollten die für die Bewertung der Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge verwendeten Indikatoren in zukünftigen Arbeiten auf Basis technologischer Entwicklungen im Bereich der Sensoren oder der Software automatisierter Fahrsysteme (Berücksichtigung der fortschreitenden technologischen Entwicklung, Erlernen komplexer Szenarien durch Realbetrieb oder in der Simulation) weiter angepasst werden, um in der Bewertung mit den technologischen Entwicklungen bei automatisierten Fahrsystemen Schritt zu halten.

Forschungsbedarf aus der Erreichbarkeitsanalyse (siehe Kapitel 4)

Verwendung eines Verkehrsnachfragemodells

- Im Rahmen der durchgeführten Erreichbarkeitsmodellierung wurde kein Verkehrsnachfragemodell verwendet und auch keine Belastungen im Netz simuliert. Es gibt Forschungsbedarf bei der Erweiterung der durchgeführten Analyse mit Ergebnissen aus diesen erwähnten Verkehrsnachfragemodellen, wobei auch für diese eigene Angebotsformen zuerst definiert und implementiert werden müssten.
- Mit den Ergebnissen aus dem Verkehrsnachfragemodell und weiteren Auslastungs- und Nachfrageindikatoren könnte die Betrachtung detaillierter für evident-sinnvolle Bereiche durchgeführt werden.
- Im Rahmen von Verkehrsnachfragemodellen könnten unterschiedliche Betriebs- und Angebotsformen von automatisierten Shuttles simuliert und verglichen werden.
- Zu den Auswirkungen der automatisierten Angebotsformen hinsichtlich CO₂-Bilanz sowie weiteren klimarelevanten Indikatoren (Flächenverbrauch, Ressourcenschonung, ...) besteht weiterer Forschungsbedarf. Voraussetzung dafür ist ebenfalls ein Verkehrsnachfragemodell

Betriebsparameter für automatisierte Angebotsformen

- Die im Bereich der ÖV-Modellierung übliche Gewichtung der empfundenen Reisezeit durch unterschiedliche Parameter (Zugangszeit, Abgangszeit, Umsteigezeit, ... - vgl. Vrtic et al. 2005) sollte auch im Kontext der Modellierung automatisierter Angebotsformen untersucht werden.
- Die Integration von Verkehrsdrehscheiben am Übergang vom niederrangigen zu höherrangigen automatisierten Angebotsformen und deren Integration in Erreichbarkeits- oder Verkehrsmodellierungen stellt eine weitere Aufgabe für die Forschung dar. Neue oder bestehende Standorte für diese Verkehrsdrehscheiben müssten zuvor mit einem definierten Betriebskonzept identifiziert werden, wobei dieses Konzept auch Zufahrten und Leerfahrten zu und von Depots und Wartepätzen berücksichtigen sollte.

Tools für die Raumanalyse automatisierter Angebotsformen

- Das Potenzial der aF-Befahrbarkeit kann nicht in allen Räumen genutzt werden – besonders dann, wenn einzelne, kürzere Infrastrukturabschnitte die Abgrenzung

grösserer ODDs verhindern – s.g. Bottlenecks. Es gilt zukünftig Tools zu entwickeln, die diese Bottlenecks auf Basis noch zu definierender aF-Betriebsformen verlässlich identifizieren und so eine Diskussionsgrundlage für mögliche Anpassungen der Infrastruktur darstellen.

Forschungsbedarf aus der Abschätzung der veränderten Flächenbedarfe (siehe Kap. 5)

- Für die in Bezug auf den veränderten Flächenbedarf durch kaF vorgestellten Ergebnisse, konnten teilweise nur Schätzungen verwendet werden. Besonders im Fall der Abschätzung der Parkplatzflächen sollte daher die Datenlage dringend verbessert werden. Dies vor allem auch, weil diese Flächen nicht alleine von einer Transformation im Kontext der Automatisierung betroffen wären, sondern auch im Zuge einer Mobilitätswende zur Debatte stehen. Die Potenziale dieser Flächen sind enorm.
- Um die Grösse der Flotten abzuschätzen, wurde auf die Annahmen anderer Studien zurückgegriffen. Es bedarf eigenständiger Nachfragemodellierungen, damit die Zahl der Fahrzeuge und deren Platzbedarfe besser abgeschätzt werden können.
- Die Flächeninanspruchnahme von intermodalen Knoten für kaF muss weiter beforscht werden. Es wurde gezeigt, dass diese in Grösse und Ausstattung variieren und darüber hinaus im Anwendungsfall automatisiertes Fahren auf der Autobahn eine Voraussetzung für dieses Angebot sind – nicht nur in einem Standort, sondern über ein Netz möglicher Verbindungen und deren Schnittstellen zum bestehenden (hochrangigen) ÖV.
- Auch die vorgestellten Ergebnisse zum Flächenbedarf PKW-assoziierter Betriebe konnte nur durch eine Abschätzung erfolgen. Die Zuordnung von exakt verorteten Adressdaten zu Gebäuden war herausfordernd und nur über eine Annäherung möglich. Die Ableitung des tatsächlichen Flächenbedarfs beruht auf einer Schätzung auf Basis der Beschäftigtenzahlen. Um diese Abschätzung zu präzisieren wäre eine eigene Erhebung notwendig.
- Das Ergebnis der Gebäudegrundflächen der PKW-assozierten Betriebe berücksichtigt keine Nachbarschaftsanalyse – insofern konnten auch grössere zusammenhängende räumliche Cluster nur über visuelle Zugänge identifiziert werden. Für die Identifikation tatsächlicher Potenzialflächen für Nachverdichtung oder Stadtentwicklung müssten zuerst zusammenhängende Flächen abgeleitet werden.
- Die Auswahl der PKW-assozierten Betriebe anhand der STATENT-Daten stellt ebenso eine Annäherung dar. Es wurden alle PKW-assozierten NOGA-Kategorien identifiziert und danach alle Betriebe in diesen Kategorien für die Analyse genutzt. Eine Einschätzung hinsichtlich des Fortbestands des Unternehmens nach einer grossräumigen Transformation der Mobilität mit automatisierten Fahrzeugen wurde nicht vorgenommen.

Forschungsbedarf aus dem Vergleich der Ergebnisse mit den raum- und verkehrsplanerischen Zielsetzungen sowie der Ableitung von Fragen und Handlungsempfehlungen

- Die vorgestellten Überlegungen fokussieren auf das RZU-Gebiet als Fallbeispiel. Für Erkenntnisse zu den räumlichen Auswirkungen abseits der Agglomeration müssen separate Studien durchgeführt werden.
- Aus der Arbeit wird die Notwendigkeit einer Regulierung von automatisiertem Fahren abgeleitet und es werden mögliche Chancen und Risiken benannt. Die Wirksamkeit der Regulierung und die (Weiter-) Entwicklung zielgerichteter Regulierungsansätze gilt es zu vertiefen.
- Als Grundannahme wird von kaF ausgegangen, das in das bestehende ÖV-Netz eingebunden ist. Angesichts der erkannten Chancen und Risiken muss die Rolle von kaF weiter beurteilt werden und die Erkenntnisse müssen in die Weiterentwicklung der bestehenden Ansätze einfließen. Dabei geht es unter anderem um folgende Punkte:

- Konkrete Entwicklung möglicher Angebote von kaF in Ergänzung zum klassischen ÖV und Integration in die bestehende Netz- und Tarifstruktur
- Ermittlung von Potenzialen von kaF zur Attraktivierung des ÖV mit dem Ziel eines entsprechend höheren Anteils im Modal Split
- Hierarchie und Struktur von aF-Verkehrsdrehscheiben in die bestehende ÖV-Struktur integrieren.
- Potenziale der Integration der Autobahn untersuchen (Abwägung der Infrastrukturinvestition mit den Erreichbarkeitspotenzialen).
- Analyse der Personengruppen für die ein verbessertes Angebot geschaffen werden kann und der Lagen, an denen vorhandene ÖV-Kapazitäten besser ausgeschöpft werden können
- kaF an Verkehrsdrehscheiben so einbinden, dass der Umstieg attraktiv ist.
- Die aF-Befahrbarkeit ist eine technische Perspektive auf das bestehende Strassennetz. Diese Analyse ist ohne begleitende Betrachtungen der strassenräumlichen Verträglichkeit (kollektiven) automatisierten Fahrens unvollständig. Zur Beurteilung der Verträglichkeit liegt ein erster Entwurf einer Methodik vor (Soteropoulos 2021).
- Für die Veränderungen in der Flächennutzung spielt die zeitliche Komponente und damit im Zusammenhang die Marktdurchdringung durch kaF eine wesentliche Rolle. Um optimal auf mögliche Entwicklungen vorbereitet zu sein und geeignete regulatorische Massnahmen formulieren zu können, sollten tiefergehende Erkenntnisse zur potenziellen Reihenfolge bzw. Wahrscheinlichkeit zusätzlich benötigter (Depots, Halteflächen) und freiwerdender Flächen gewonnen werden. Dabei steht vor allem die Frage: Welche Flächenbedarfe entstehen und wie können diese mit den bestehenden Nutzungen in Einklang gebracht werden? im Vordergrund.
- Angesichts der potenziellen zusätzlichen Flächenbedarfe an und der Notwendigkeit der Erreichbarkeit von Verkehrsdrehscheiben durch kaF sollten die Typologien der Verkehrsdrehscheiben um die Belange von kaF erweitert werden. So könnte in der Planung von Betriebsgebieten, die Integration ins bestehende Angebot sichergestellt werden. Dies gilt insbesondere bei einer allfälligen Integration der Autobahnen.
- Im Projekt wurden hinsichtlich der Klimawirkungen und weiteren Umweltauswirkungen keine Analysen durchgeführt, weshalb die Zielsetzungen in diesem Bereich nicht verglichen werden konnten. Diesbezügliche Chancen und Risiken müssen in anschliessenden Arbeiten vertieft werden.
- Über ein Realexperiment potenzieller Betriebsgebiete können umfassend bekannte und unbekanntes gesellschaftliche, ökologische, ökonomische Wirkungen und Nebenwirkungen erfasst werden. Durch die 2023 erfolgten Änderungen im Schweizerischen Strassenverkehrsgesetz wird dies ermöglicht. Die in Kapitel 7 formulierten Fragestellungen können auf diesem Weg konkret diskutiert und behandelt werden:
 - Strukturen und Prozesse für die Umsetzung in Verwaltung und Politik aufbauen.
 - Eignung von aF-Betriebsgebieten diskutieren und festlegen (in Abstimmung mit den raumplanerischen Zielsetzungen).
 - Kriterien und Qualitäten zur Ausgestaltung des Angebots definieren und verhandeln, z.B. Anzahl, Lage und Grösse von aF-Depots und (Vor-)Halteflächen.
 - Forschungsdesign und -infrastruktur für nötiges, breites Monitoring und Evaluierung hinsichtlich der Auswirkungen auf Raum, Verkehr, Umwelt, Gesellschaft mit dem Fokus Reboundeffekte entwickeln.
 - Zivilgesellschaft einbinden (Partizipation in Planungsprozessen, Initiativen unterstützen, Testläufe ermöglichen).
 - Regulierungsoptionen entwickeln.
- Die Analysen zur aF-Befahrbarkeit wurden in diesem Projekt allein im Hinblick auf die Nutzung des automatisierten Fahrens im Personenverkehr betrachtet. Die Ergebnisse sollten ebenso für beispielsweise mögliche Nutzungen und Auswirkungen im Güterverkehr genutzt werden.

Anhänge

Die Anhänge (Detailbeschreibung der Gebietstypen und Analysekarten) sind separat erhältlich und können an der gleichen Stelle wie der Bericht Nr. 1747 zum Forschungsprojekt MB4_20_00A_01 von <https://www.mobilityplatform.ch/> heruntergeladen werden. Dem gedruckten Bericht liegen die Anhänge als CD bei.

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Bedeutung
aF	Automatisiertes Fahren
aF-Befahrbarkeit	Bewertung von Strassenräumen hinsichtlich ihrer Komplexität für automatisierte Fahrzeuge, d. h. welche Teile des Strassennetzes aus technisch-infrastruktureller Sicht besser bzw. schlechter mit automatisierten Fahrzeugen befahren werden können
aF-Betriebsgebiete	Gebiete, in denen aufgrund verschiedener Parameter der ÖV durch ein kollektives automatisiertes Angebot ergänzt werden kann
GIS	Geographisches Informationssystem
GKAT	Merkmal Gebäudekategorie im GWR
GPS	Global Positioning System
GTFS	General Transit Feed Specification
GVM-ZH	Gesamtverkehrsmodell Kanton Zürich
GWR	Gebäude- und Wohnungsregister
kaF	Kollektives automatisiertes Fahren
kaF-letzte Meile	Kollektives automatisiertes Fahren auf der letzten Meile Angebotsform einer kollektiven Nutzung automatisierten Fahrens in Ergänzung zum bestehenden ÖV und nur in Einzelfällen als Ersatz, die die letzte/erste Meile vom Quell- bzw. zum Zielort adressiert
kaF-Autobahn	Kollektives automatisiertes Fahren auf der Autobahn kollektive Nutzung automatisierten Fahrens in Ergänzung zum bestehenden ÖV und nur in Einzelfällen als Ersatz, die die Nutzung der Autobahn in das ÖV-System integriert
Mischverkehrsphase	Zeitraum, in dem konventionelle und automatisierte Fahrzeuge gleichzeitig im Strassennetz unterwegs sind und eine (langsame) Marktdurchdringung erfolgt (Level 4)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NOGA	Allgemeine Systematik der Wirtschaftszweige
ODD	Operational Design Domain
ÖV	Öffentlicher Verkehr
Pkw-assozierte Flächen	Flächen bzw. Einrichtungen, die dem Betrieb, dem Recycling, der Wartung sowie der Produktion und dem Handel von Pkw dienen und auf charakteristische Weise die Siedlungsstruktur der Automobilität prägen. Unter anderem: Tankstellen, Waschanlagen oder Autohäuser.
Regio-ROK	Regionales Raumordnungskonzept
RPG	Bundesgesetz über die Raumplanung
RZU	Planungsdachverband Region Zürich und Umgebung
SAE	Society of automotive engineers
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
TLM	Topographisches Landschaftsmodell
Veränderung Erreichbarkeitspotenzial	Veränderung des Erreichbarkeitspotenzials im ÖV durch zusätzliche kollektive automatisierte Angebotsformen Dabei: Erreichbarkeit als Standortqualität eines Raumpunktes, die sich aus seinen verkehrlichen Beziehungen zu anderen Raumpunkten (ausgedrückt durch Reisezeiten) und deren Attraktionspotenzial (Einwohner oder Arbeitsplätze) ergibt
ZVV	Zürcher Verkehrsverbund

Literaturverzeichnis

- AustriaTech (2019), „Automatisierte Mobilität in Österreich. Monitoring Bericht 2018“. Wien, <https://austriatech.at/assets/Uploads/Publikationen/PDF-Dateien/7c53ca1c85/Automatisierte-Mobilitat-in-Osterreich-WEB.pdf>
- Boggs, A. M.; Arvin, R.; Khattak, A. J. (2020a). „Exploring the who, what, when, where, and why of automated vehicle disengagements“. *Accident Analysis & Prevention*, 136, 105406.
- Alkim, T. (2018), „The ODD framework“, *Präsentation im Rahmen des Automated Vehicles Symposium*, 9-12 Juli 2018, San Francisco.
- R. Amadeo, R. (2021), „Waymo expands to San Francisco with public self-driving test“. <https://arstechnica.com/gadgets/2021/08/waymo-expands-to-san-francisco-with-public-self-driving-test/>.
- AustriaTech (2019), „Automatisierte Mobilität in Österreich. Monitoring Bericht 2018“, Wien, <https://austriatech.at/assets/Uploads/Publikationen/PDF-Dateien/7c53ca1c85/Automatisierte-Mobilitat-in-Osterreich-WEB.pdf>.
- Axhausen, K. W. (2006), „Rationale Parkstandsbereitstellung: Auch eine Besprechung von D. Shoups“ the high costs of free parking“, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, 358.
- Axhausen, K., Livingston, C., Hörl, S., Bruns, F., Fischer R. & Tasnády B. (2020), „Auswirkungen des automatisierten Fahrens“, Teilprojekt 2; Verkehrliche Auswirkungen und Infrastrukturbedarf.ASTRA.
- Axhausen, K.W.; Livingston C.; Hörl, S.; Bruns, F.; Fischer, R.;Tasnády, B. (2020), „Auswirkungen des automatisierten Fahrens Teilprojekt 2; Verkehrliche Auswirkungen und Infrastrukturbedarf“, ASTRA.
- Axhausen, K.W.; Livingston, C.; Hörl, S.; Bruns, F.; Fischer, R.; Tasnády, B. (2020), „Auswirkungen des Automatisierten Fahrens; Teilprojekt 2: Verkehrliche Auswirkungen und Infrastruktur“, Bundesamt für Strassen ASTRA.
- Balac, M., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2017), „Modeling the impact of parking price policy on free-floating carsharing: Case study for Zurich, Switzerland“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77, 207-225.
- Bartels, B.; & Erbsmehl, C. (2014). „Bewegungsverhalten von Fußsgängern im Straßsenverkehr, Teil 1“, FAT-Schriftenreihe, (267).
- Bertolini, L. (2012), „Integrating Mobility and Urban Development Agendas – A Manifesto“, *disP – The Planning Review* 48(1), 16–26.
- Bertolini, L. (2017), „Planning the Mobile Metropolis: Transport for People, Places and the Planet“, London: Palgrave/Red Grove Press.
- Boesch, P.; Ciari, F.; Axhausen, K.W. (2016), „Autonomous vehicle fleet sizes required to serve different levels of demand“ *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2542, S. 111–119.
- Boesch, P.; Ciari, F.; Axhausen, K.W.; Boesch, F. Ciari, K.W. Axhausen, (2018), „Transport policy optimization with Avs“. *Präsentiertes Paper im Rahmen des TRB annual Meetings*.
- Boggs, A.M.; Wali, B.; Khattak, A. J. (2020b), „Exploratory analysis of automated vehicle crashes in California: A text analytics & hierarchical Bayesian heterogeneity-based approach“, *Accident Analysis & Prevention*, 135, 105354.
- Brake, A. G. (2016), „MIT researchers plan "death of the traffic light" with smart intersections“, Online: <https://www.dezeen.com/2016/03/21/light-traffic-junctions-mit-research-smart-intersections-design-driverless-vehicles/>.
- Braun, M.; Krebs, S.; Flohr, F.; Gavrilă, D.M. (2018), „The EuroCity persons dataset: a novel benchmark for object detection“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- Bruck, E. M.; Scheuven, R.; Berger, M. (2021), „Steuerung und Gestaltung von räumlichen Schnittstellen der Mobilität“, *AVENUE21. Politische und planerische Aspekte der automatisierten Mobilität* (pp. 133-158). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Bruns, F., Rothenfluh, M., Neuenschwander, M., Sutter, M., Belart & B., Egger, M. (2018), „Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz“, <https://www.ebp.ch/sites/default/files/project/uploads/2018-04-19%20aFn%20M%C3%B6gliche%20Angebotsformen%20im%20kollektiven%20Verkehr%20Schlussbericht%20.pdf>
- Bugala, M. (2018), „Algorithms applied in autonomous vehicle systems“, *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe* 50 (4), S. 119–138.
- Bühlmann, F.; Laube, M. (2013), „Verträglichkeit Strassenraum. Methodik und Ergebnisse“, Kanton Zürich. Zürich: Amt für Verkehr.

- BAV (2022), „**Vernehmlassungsverfahren zum Bericht zum Stand der Ausbauprogramme für die Bahninfrastruktur mit Änderungen an den Bundesbeschlüssen und zur Perspektive BAHN 2050**“, erläuternder Bericht vom 22.06.2022, Bundesamt für Verkehr BAV.
- Busch, F., Krause, S., Fehn, F., Richner, M., Armbruster, S. & Winzer, T. (2020), „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens**“, *Teilprojekt 5: Mischverkehr*. ASTRA.
- Busch, F.; Krause, S.; Fehn, F.; Richner, M.; Armbruster, S.; Winzer, T. (2020), „**Auswirkungen des Automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr**“, Bundesamt für Strassen ASTRA.
- Campbell, M.; Egerstedt, M.; How, J. P.; Murray, R. M. (2010), „**Autonomous driving in urban environments: approaches, lessons and challenges**“, *Philos. Trans. Royal Soc. A* 368, S. 4649–4672.
- Chen, X., Lin, X., He, F., & Li, M. (2020), „**Modeling and control of automated vehicle access on dedicated bus rapid transit lanes**“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102795.
- Christensen, H.; Paz, D.; Zhang, H.; Meyer, D.; Xiang, H.; Han, Y.; Liu, Y.; Liang, A.; Zhong, Z.; Tang, S. (2021), „**Autonomous vehicles for micro-mobility**“, *Autonomous Intelligent Systems*, 1(1), S. 1-35.
- Compostella, J., Fulton, L. M., De Kleine, R., Kim, H. C., & Wallington, T. J. (2020), „**Near-(2020) and long-term (2030–2035) costs of automated, electrified, and shared mobility in the United States**“, *Transport Policy*, 85, 54-66.
- Cyganski, R. (2015), „**Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren aus Sicht der Nachfragemodellierung**“, *Autonomes Fahren*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 241-263.
- Cyganski, R. (2015), „**Autonome Fahrzeuge und autonomes fahren aus Sicht der Nachfragemodellierung**“, In *Autonomes Fahren* (pp. 241-263). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Czarnecki, K. (2018), „**Operational design domain for automated driving systems. Taxonomy of Basic Terms. Requirements Analysis Framework for Automated Driving Systems**“, WISE Lab, Waterloo.
- Del Duce, A., Trachsel, T. & R. Hoerler (2020), „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 6: Räumliche Auswirkungen**“, Bundesamt für Strassen ASTRA.
- Dempsey, D. (2019), „**11 Myths About GPS for Autonomous Vehicles**“, *ElectronicDesign*, <https://www.electronicdesign.com/automotive/11-myths-about-gps-autonomous-vehicles>.
- Deng, T. (2013), „**Impacts of transport infrastructure on productivity and economic growth: Recent advances and research challenges**“, *Transport Reviews* 33(6), 686–699.
- DMV – California Department of Motor Vehicles (2022), „**Disengagement Reports**“, <https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/disengagement-reports/>.
- Europäische Kommission (2017), „**C-ITS Platform. Draft Final report Phase II**“, https://www.polisnetwork.eu/wp-content/uploads/2019/06/phase-ii-c-its-platform-draft-final-report-september-2017_v1.0.pdf.
- Europäische Kommission (2022), „**Durchführungsverordnung (EU) 2022/1426**“ der Kommission mit detaillierten Regelungen zur Durchführung der Verordnung (EU) 2019/2144 des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die einheitlichen Verfahren und technischen Spezifikationen für die Typgenehmigung des automatisierten Fahrsystems (ADS) vollautomatisierter Fahrzeuge, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022R1426>
- EuroRAP (2018), „**Roads that cars can read III. Tackling the Transition to Automated Vehicles**“, Brüssel.
- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. M. (2018), „**Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas**“, *Transportation*, 45(1), 143-158.
- Favarò, F., Eurich, S., & Nader, N. (2018), „**Autonomous vehicles’ disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations**“, *Accident Analysis & Prevention*, 110, 136-148.
- Favarò, F.M.; Nader, N.; Eurich, S.O.; Tripp, M.; Varadaraju, N. (2017), „**Examining accident reports involving autonomous vehicles in California**“, *PLoS one*, 12(9), e0184952.
- Fehlberg, H.; Pirkelbauer, S. (2020), „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Erkenntnisse und Massnahmen aus Sicht des ASTRA**“, ASTRA.
- Fellendorf, M. (2018), „**Strassenbauliche Infrastruktur und VLSA für automatisierte Fahrzeuge**“, *Präsentation im Rahmen des Workshops des Forschungsprojekts AUTO-NOM*, Wien.
- Frick, R.; Kugelmeier, N.; Ickert, L.; Sieber, M.; Stoiber, T.; Tasnády, B.; R. Straumann, R. (2015), „**Normierte gesamtverkehrliche Erschließungsqualitäten – Grundlagenbericht**“, Bundesamt für Strassen ASTRA.
- Friedrich, B. (2015), „**Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge**“, *Autonomes Fahren*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S.331-350.
- Friedrich, B. (2015), „**Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge**“, In *Autonomes Fahren* (pp. 331-350). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Friedrich, M. (2003): „**Verkehrsplanung II – Skript V1.1**“, Institut für Verkehrswesen Universität Stuttgart
- Gemeindeportrait, Interaktive Applikation – Kanton Zürich. Online: <https://www.zh.ch/de/politik-staat/gemeinden/gemeindeportraet.html>

- Gidam, M. (2019), „**Anwendungspotenzial von General Transit Feed Specification für Erreichbarkeitsanalysen in Netzwerkmodellen - Am Beispiel einer Wohnstandortanalyse der Bevölkerungsgruppe 65+ in Wien**“, TU Wien.
- GM Cruise (2021), „**Driverless Deployment Program Guidance for First Responders**“. https://drive.google.com/file/d/1qjR38RAQ2cgjxic69TMseT_-BhjCGrVh/view.
- Goodall, N. J. (2021), „**Comparison of automated vehicle struck-from-behind crash rates with national rates using naturalistic data**“, *Accident Analysis & Prevention*, 154, 106056.
- Heinrichs, D. (2015), „**Autonomes Fahren und Stadtstruktur**“, *Autonomes Fahren*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 214-240.
- Heinrichs, D. (2015), „**Autonomes Fahren und Stadtstruktur**“, In *Autonomes Fahren* (pp. 214-240). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Hope, G. (2022), „**Cruise Expands Robotaxi Service Across San Francisco**“, <https://www.iotworldtoday.com/2022/11/10/cruise-expands-robotaxi-service-across-san-francisco/>.
- Hörl, S., Axhausen, K.W., Ciari F. und Dubernet, T. (2019), „**Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung**“.
- Hörl, S.; Becker, F.; Axhausen, K.W. (2020), „**Automated Mobility on Demand: A comprehensive simulation study of cost, behaviour and system impact for Zurich**“, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, 1534, IVT, ETH Zurich, Zurich.
- Hörl, S.; Ruch, C.; Becker, F.; Frazzoli, E.; Axhausen, K.W. (2019), „**Fleet operational policies for automated mobility: A simulation assessment for Zurich**“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 102, S. 20-31.
- INFRAS (2021): „**Perspektive BAHN 2050, Studie zum Kernsatz 6: Beitrag der Bahn zum Verlagerungsziel**“. Infras im Auftrag des Bundesamtes für Verkehr. Bern.
- International Transport Forum (2018), „**Safer Roads with Automated Vehicles?**“, *OECD*, Paris.
- Jermann, J.; Steinle, M.; Luisoni, A.; Bohne, S.; Schweizer, N.; Schmid, T. (2020), „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens. Teilprojekt 4: Neue Angebotsformen**“, Bundesamt für Strassen ASTRA.
- Johnson, C. (2017), „**Readiness of the Road Network for Connected and Autonomous Vehicles**“, Royal Automobile Club Foundation, London.
- Justen, A., Ancel, R.; Mathys, N.; Schiller, C. (2022), „**Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050**“, *ARE – Bundesamt für Raumentwicklung*.
- Kanton Zürich (2018), „**Gesamtverkehrskonzept Kanton Zürich 2018**“, *RRB Nr.25/2018*.
- Kanton Zürich (2022a), „**Kantonaler Richtplan**“.
- Kanton Zürich (2022b), „**Raumplanungsbericht 2021**“, *RBB Nr. 355/2022, Vorlage 5805*.
- Kanton Zürich (2022c), „**Sozialbericht Kanton Zürich 2021**“.
- Koopman, P.; Fratrick, D. (2019), „**How Many Operational Design Domains, Objects, and Events?**“, *Safe AI 2019: AAAI Workshop on Artificial Intelligence Safety*, 27. Januar 2019.
- Kopko, M. (2019), „**Safe Integration of Automated Vehicles (AV) in Work Zones. Part 1**“, *Project Narrative and Technical Approach*. Pennsylvania Department of Transportation, Harrisburg.
- Lenz, B., & Fraedrich, E. (2015), „**Neue Mobilitätskonzepte und autonomes Fahren: Potenziale der Veränderung**“, *Autonomes Fahren*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 175-195
- C. Livingston, C.; S. Hörl, S.; F. Bruns, F.; R. Fischer, R.; K.W. Axhausen, K.W. (2020), „**Forecasting a future with automated vehicles in Switzerland: Exploring the urban-rural divide and system effects**“, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, 1541, IVT, ETH Zurich, Zurich.
- Lv, C.; Cao, D.; Zhao, Y; Auger, D. J.; Sullman, M.; Wang, H.; Dutka, L. M.; Skrychuk, L.; Mouzakitis, A.C. Lv, D. Cao, Y. Zhao, D.J. Auger, M. Sullman, H. Wang, L.M. Dutka, L. Skrychuk, A. Mouzakitis (2018), „**Analysis of autopilot disengagements occurring during autonomous vehicle testing**“, *IEEE/CAA J. Automatica Sinica* 5 (1), S. 58–68.
- Martin, R., Bruck, E. und Soteropoulos, A. (2021), „**Transformations of European Public Spaces with AVs**“, In *Avenue 21*. S.159-178.
- Meyer, J.; Becker, H.; Bösch, P.; Axhausen, K.W. (2017), „**Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities?**“, *Research in transportation economics*, 62, S. 80-91.
- Mitteregger, M.; Bruck, E. M.; Soteropoulos, A.; Stickler, A.; Berger, M.; Dangschat, J. S.; Banerjee, I. (2020), „**Automatisierter und vernetzter Verkehr: Entwicklungen des urbanen Europa**“, *AVENUE21*, Springer-Verlag.
- Mitteregger, M.; Soteropoulos, A. (2021), „**Chancen vergangener Fehler: Flächenpotentialpotenziale am Weg zu einem automatisierten Mobilitätssystem**“, *AVENUE21. Politische und planerische Aspekte der automatisierten Mobilität*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

Mobilitätsarena 2022 der Schweizer Mobilitätsakademie, Teil Automaticar am 20.09.2023 in Bern. <https://www.mobilitaetsarena.ch/de/index.php>

Mybuxi (2022). Fahrt auf Verlangen. <https://mybuxi.ch/>

Nowakowski, C.; Shladover, S.; Chan, C.Y.; Tan, H.S. (2015), „**Development of California regulations to govern testing and operation of automated driving systems**“, *Journal of the Transportation Research Board* 2489 (1), S. 137–144.

Oehry, B., Frick, R., Bohne, S., Jermann, J., Ickert, L., Schippl, J. und Hömke, M. (2020). „**Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 1: Nutzungsszenarien und Auswirkungen**“. ASTRA, Schweiz.

Oswald, M. (2012), „**Ein Modell des ruhenden Verkehrs in Zürich: Validation und Massnahmenbewertung**“, *Doctoral dissertation, Master Thesis. ETH Zurich.*

Pendleton, S.D.; Andersen, H.; Du, X.; Shen, S.; Meghjani, M.; Eng, Y.H.; Rus, D.; Ang Jr., M.H. (2017), „**Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles**“, *Machines* 5 (6), S. 1–54.

Perret, F.; Arnold, T.; Fischer, R.; de Haan, P.; Haefeli, U. (2020), „**Automatisiertes Fahren in der Schweiz: Das Steuer aus der Hand geben?**“, Hochschulverlag ETH Zürich, Zürich.

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

Peter, M. (2021), „**Die Berechnung kleinräumiger und multimodaler Erreichbarkeiten auf regionaler Ebene**“, *Hamburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik – Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Logistik*, Band 22.

PostAuto (2021), „**Die SmartShuttles rollen in Uvrier weiter**“. <https://www.postauto.ch/de/ueber-uns-und-aktuelles/medien/medienmitteilungen/2021/die-smartshuttles-rollen-in-uvrier-weiter>

Prakken, H. (2017), „**On the problem of making autonomous vehicles conform to traffic law**“, *Artificial Intelligence Law* 25 (3), S. 341–363.

Radwan, N.; W. Winterhalter, W.; C. Dornhege, C.; W. Burgard, W. (2017). „**Why did the robot cross the road? - Learning from multi-modal sensor data for autonomous road crossing**“, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 24.-28. September 2017, Vancouver, S. 4737–4742.

Ramanagopal, M. S.; Anderson, V.; Vasudevan, R.; Johnson-Robertson, M. (2018), „**Failing to learn: autonomously identifying perception failures for self-driving cars**“, *IEEE Rob. Autom. Lett.*

Räth, Y.M.; Balác, M.; Hörl, S.; Axhausen, K.W. (2021), „**System level policies for automated transit on-demand services**“, ETH Zürich, <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/474208/ab1597.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

„**Regionale Richtpläne**“: aktuelle Versionen <http://maps.zh.ch/> (Abschnitt Raumplanung)

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

RZU et. al. 2018, „**Zürich als Wohnregion denken und entwickeln. Empfehlungen für einen wohnpolitischen Dialog im RZU-Gebiet**“, RZU | Planungs Dachverband Region Zürich und Umgebung, Stadtentwicklung Zürich (STEZ) und BaslerFonds, Zürich. 2018.

Schwarze, B. (2015). „**Eine Methode zum Messen von Naherreichbarkeit in Kommunen**. Dissertation. Technische Universität Dortmund, <https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/34458>

Schwarze, B. (2015). „**Eine Methode zum Messen von Naherreichbarkeit in Kommunen: Erreichbarkeit als strategisches Ziel von Raum- und Verkehrsplanung: ein Ansatz zur Evaluation von Naherreichbarkeit in Kommunen**“, *Doctoral dissertation, Dortmund, Technische Universität, 2015.* <https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/34458>

Shladover, S.E. (2018), „**Practical challenges to deploying highly automated vehicles**“, *Präsentation im Rahmen von Drive Sweden, Göteborg, Schweden*, <https://www.drivesweden.net/sites/default/files/content/bilder/practicalchallenges4driveswedn.pdf>.

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

Shoup, D. (2005), „**The high cost of free parking**“, *American Planning Association.*

Soteropoulos, A. (2021), „**Automated Drivability und strassenräumliche Verträglichkeit im Stadt-Land-Kontinuum am Beispiel der Stadtregion Wien**“, *AVENUE21. Politische und planerische Aspekte der automatisierten Mobilität*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 41-74.

A. Soteropoulos, A. (2021), „**Automated Drivability und strassenräumliche Verträglichkeit im Stadt-Land-Kontinuum am Beispiel der Stadtregion Wien**“, *AVENUE21. Politische und planerische Aspekte der automatisierten Mobilität*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 41-74.

Soteropoulos, A. (2022), „**Automatisierte Fahrzeuge: Effekte und Einsatz unter Berücksichtigung der Heterogenität von Strassenräumen**“, Dissertation, Technische Universität Wien.

- Soteropoulos, A., Berger, M. und Ciari, F. (2019), „**Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: An international review of modelling studies**“, *Transport Reviews*, 39(1), 29-49.
- Soteropoulos, A.; Mitteregger, M.; Berger, M.; Zwirchmayr, J. (2020). „**Automated drivability: toward an assessment of the spatial deployment of level 4 automated vehicles**“. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 136, S. 64-84.
- Tchervenkov, C. M. (2022): „**Empirical and simulation studies on parking in Switzerland**“. Dissertation ETH Zürich
- Thorn, E.; Kimmel, S.; Chaka, M. (2018), „**A framework for automated driving system testable cases and scenarios**“, *Report No. DOT HS 812 623*. NHTSA, Washington, DC.
- Transport Systems Catapult (2017), „**Future Proofing Infrastructure for Connected and Automated Vehicles. Technischer Bericht**“, Milton Keynes.
- Van Brummelen, J.; O'Brien, M.; Gruyer, D.; Najjaran, H. (2018), „**Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow**“, *Transportation Research Part C* 89, S. 384–406.
- Vogt, K. (2017), „**Why testing self-driving cars on the challenging roads of San Francisco is necessary**“. <https://www.vox.com/2017/10/3/16413068/testing-self-driving-cars-san-francisco-challenging-necessary>.
- Vrtic, M.; Fröhlich, P.; Schüssler, N.; Axhausen, K. W.; & Schulze, C. (2005), „**Verkehrsmodell für den öffentlichen Verkehr des Kantons Zürich: Endbericht**“, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, 324.
- Weber 2022, Vortrag „**Pilotprojekt Pikmi der VBZ – Resultate und Erfahrungen**“ im Rahmen des Mobilitätslunchs des Kantons Zürich vom 08.11.2022.
- Wegener, M.; Fürst, F. (1999), „**Land-Use Transport Interaction – State of the Art**“, *Berichte aus dem Institut für Raumplanung* 46. Dortmund: Technische Universität Dortmund.
- Weidmann, U. (1993). „**Transporttechnik der Fußsgänger: transporttechnische Eigenschaften des Fußsgängerverkehrs, Literaturlauswertung**“. *IVT Schriftenreihe*, 90
- Winkelhake, U. (2017), „**Die digitale Transformation der Automobilindustrie**“, *Springer Verlag*. Berlin.
- Winter, K., Cats, O., Martens, K., & van Arem, B. (2021), „**Relocating shared automated vehicles under parking constraints: assessing the impact of different strategies for on-street parking**“, *Transportation*, 48(4), 1931-1965.
- Yi, Z., & Smart, J. (2021), „**A framework for integrated dispatching and charging management of an autonomous electric vehicle ride-hailing fleet**“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95, 102822.
- Zhang, W.; Guhathakurta, S.; Fang, J.; Zhang, G. (2015), „**Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach**“, *Sustainable Cities and Society*, 19, 34-45.

Daten (weitere Quellenangaben im Text)

Gemeindeporträts des Kantons Zürich

Quartieranalyse des Statistischen Amtes des Kantons Zürich

STATENT

STATPOP

TLM

Maps.zh.ch

Open Street Map

Statista (2022), „**Bevölkerungsdichte in der Schweiz nach Kantonen am 31. Dezember 2021**“

Statistik Stadt Zürich (2021), „**Bevölkerungsstatistik (BVS)**“

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 03.03.2023

Grunddaten

Projekt-Nr.: MB4_20_00A_01

Projekttitel: räumlich-differenzierte Auswirkungen des automatisierten Fahrens

Enddatum: 31.05.2023

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Durch die Analyse der aF-Befahrbarkeit wurde deutlich, dass die RZU-Region hinsichtlich des Einsatzes automatisierter Fahrzeuge keinen homogenen Raum darstellt, sondern das Strassennetz aus technisch-infrastruktureller Sicht eine sehr unterschiedliche Befahrbarkeit für automatisierte Fahrzeuge aufweist. Speziell Bereiche in Industriegebieten und an den Stadträndern sind durch eine gute Befahrbarkeit gekennzeichnet. Hingegen ist die Befahrbarkeit des Strassennetzes für automatisierte Fahrzeuge im Zentrum und weiteren Bereichen der Stadt Zürich, mittlerer Städte sowie auch in den Siedlungskernen in peripheren Lagen eher schlecht. Es gibt Räume, welche hier besonders durch die Erreichbarkeitsveränderung profitieren: tendenziell peripherere Lagen der urbanen Gebiete (oft am Rand des jeweiligen Siedlungskörpers mit vergleichsweise geringer Nutzungsdichte und grosszügigen Strassenräumen), Gebiete mit Bahnanschluss (wiederum vor allem in peripheren Lagen), Zentren der Klein- und Mittelstädte. Als Ergänzung wurde eine Variante berechnet, bei der automatisierte Fahrzeuge neben der letzten Meile auch auf Autobahnen unterwegs sein können. Hier profitiert das Umfeld der Autobahnen, insbesondere in peripheren Lagen und in der Nähe der Autobahnauffahrten, sowie Gebiete im Agglomerationsgürtel entlang der Autobahnen im Norden und Westen der Stadt Zürich. Zwischenräume, die weder an der Autobahn liegen noch über einen Bahnanschluss verfügen, sowie die Stadt Zürich selbst profitieren in beiden Szenarien kaum bis gar nicht. Die Betrachtung der veränderten Flächenbedarfe durch kollektives automatisiertes Fahren ergab Umnutzungspotenziale für Parkierungsflächen und Pkw-assoziierte Betriebe in der Grössenordnung von 0,5 bzw. 5 km².

Aus der Gegenüberstellung der Analysen zur aF-Befahrbarkeit, Erreichbarkeit und Flächenveränderung mit den raum- und verkehrsplanerischen Zielsetzungen ergibt sich der zwingende Bedarf einer zielgerichteten Regulierung von automatisiertem Fahren. Den planerischen und politischen Willen vorausgesetzt sollte die Ausgestaltung dieser Regulierung die formulierten Chancen und Risiken berücksichtigen.

Zielerreichung:

Die Projektziele wurden erreicht. Die Analysen zur Flächenveränderung und die Erreichbarkeitsanalyse gingen über die im Projektbeschrieb angekündigten Inhalte hinaus.

Folgerungen und Empfehlungen:

Es gibt auf fachlicher und politischer Ebene zahlreiche konkrete Fragestellungen, die vertieft werden sollten, um eine geordnete Einführung und zielgerichtete Regulierung von automatisiertem Fahren erreichen zu können: Wie kann ein zielgerichteter Einsatz von aF zur Verbesserung der Erreichbarkeit ausgestaltet werden? Welche Veränderungen am Verkehrsangebot sind langfristig gewünscht? Welche Anforderungen gibt es für die strassenräumliche Verträglichkeit? Wie können die veränderten Flächenbedarfe antizipiert werden? Wo und unter welchen Rahmenbedingungen sollten aF-Betriebsgebiete in einem Realexperiment zur Gewinnung neuer Erkenntnisse installiert werden?

Die Analysen, Schlussfolgerungen und insbesondere die formulierten Fragen im Bericht bilden eine Basis für die weitere Auseinandersetzung.

Publikationen:

-

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Eisinger

Vorname: Angelus

Amt, Firma, Institut: RZU | Planungsdachverband Region Zürich und Umgebung

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:





Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Mit der Untersuchung der Befahrbarkeit und der Veränderung der Erreichbarkeit zeigt das Projekt auf, dass eine Einführung kollektiver Angebotsformen des aF durchaus relevante Auswirkungen auf die Raumentwicklung haben kann. Mit den räumlich differenzierten Aussagen zur Befahrbarkeit, den Erreichbarkeitsgewinnen und den Platzbedarfen des aF, liefert es belastbare Grundlagen und einen tragfähigen Startpunkt für die weitergehende Forschung. Diese sollte die Veränderungen des Modal-Splits, die wirtschaftliche Umsetzbarkeit kollektiver Angebote als auch die Auswirkungen auf den ruhenden Verkehr weiter untersuchen und zudem die getroffenen Annahmen zum automatisierten Fahren überprüfen. Die Auswirkungen auf den Strassenraum und anderen Verkehrsteilnehmende sind die eigentlichen Herausforderungen, die Politik und Raumentwicklung baldmöglichst angehen sollten.

Umsetzung:

Die Annahme, dass das aF für rein kollektive Nutzungen verwendet wird, war für die Umsetzung des Projekts notwendig, erscheint aber kaum als die Entwicklung, die ohne Regulierung eintritt. Die eine kollektive Nutzung unterstützenden Regulierungsmassnahmen, aber auch jene für die individuelle Nutzung, sind baldmöglichst anzugehen. Ebenso wird empfohlen, diese Regulierungen soweit möglich in Reallaborversuchen zu testen. Ebenso sollen die Ergebnisse der Studie anderen Gebietskörperschaften - insbesondere im ländlichen Raum - vermittelt und diskutiert werden, um eine Breitenwirkung der Arbeit zu erreichen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Der in Kap 7.2 formulierte Forschungsbedarf wird gestützt. Insb.: Angebote eines kollektiven aF (in peripheren Gebieten und tangentialen Verbindungen) und Auswirkungen auf den Modal Split; Räumliche Auswirkungen individueller aF Nutzung; kurzfristig umsetzbare Automatisierungseffekte; Wechselwirkungen zwischen aF und Stadtraum (inkl. Fuss- und Veloverkehr)

Einfluss auf Normenwerk:

unmittelbar keinen

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Nollert

Vorname: Markus

Amt, Firma, Institut: urbanista.ch AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: