

Auslegung der Ladeinfrastruktur für automatisierte elektrische Fahrzeuge am Beispiel Zürichs

Florian Mathys

Bachelorarbeit
Studiengang Bauingenieurwissenschaften

Dezember 2018

Dank

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mir beim Recherchieren und Schreiben der Arbeit geholfen haben. Ein Teil der Arbeit wäre ohne die Antworten von den angeschriebenen Kontaktpersonen und deren Weiterempfehlungen nicht möglich gewesen.

Zudem geht einen grossen Dank an Sebastian Hörl, Christopher Tchervenkov und Prof. Kay W. Axhausen, welche mir während den Zwischenbesprechungen und in privaten Gesprächen wertvolle Informationen und hilfreiche Hinweise zur Arbeit gaben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Literaturrecherche	6
2.1	Autonome Fahrzeuge	6
2.2	Elektrische Fahrzeuge	8
2.3	Elektrische Ladestationen.....	11
2.4	Stromnetz	17
2.5	Flottengrösse und Strategie.....	18
3	Erarbeitung der zukünftigen Szenarien	21
3.1	Szenario Tankstelle	22
3.2	Szenario Parkhaus	23
3.3	Szenario Innovationspark Dübendorf	26
4	Quantitative Analyse	27
4.1	Annahmen	27
4.2	Formeln.....	28
4.3	Fallbeispiel 2018.....	31
4.4	Fallbeispiel 2030.....	35
4.5	Vergleich Fallbeispiel 2018 und 2030.....	39
5	Diskussion.....	41
6	Schlusswort und Ausblick.....	44
7	Literatur.....	45
8	Anhang	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Entwicklung der Speicherkapazität und Reichweite.....	10
Tabelle 2	Kostenübersicht ausgewählter Ladestationen [CHF].....	16
Tabelle 3	Massenrabatt	17
Tabelle 4	Öffentliche Parkhäuser in der Stadt Zürich.....	23
Tabelle 5	Ergebnis Szenario Tankstelle 2018.....	32
Tabelle 6	Ergebnis Szenario Parkhaus 2018	33
Tabelle 7	Ergebnis Szenario Dübendorf 2018	34
Tabelle 8	Kennwerte von Fahrzeugen und Ladestationen im Jahr 2030.....	35
Tabelle 9	Ergebnis Szenario Tankstelle 2030.....	36
Tabelle 10	Ergebnis Szenario Parkhaus 2030	37
Tabelle 11	Ergebnis Szenario Dübendorf 2030	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Mögliche Standorte für Ladestationen in der Stadt Zürich visualisiert in QGIS auf der Open Street Map	
Abbildung 2	Automatisierungsgrad von Fahrzeugen nach SAE 2016	6
Abbildung 3	Strompreis	18
Abbildung 4	Totale Fahrzeugkilometer	19
Abbildung 5	Fahrdistanz pro Fahrzeug	20
Abbildung 6	Standort Tankstellen	22
Abbildung 7	Standort Parkhäuser	25
Abbildung 8	Standort Innovationspark Dübendorf	26
Abbildung 9	Aussentemperatur 22 °C	39
Abbildung 10	Aussentemperatur -10 °C	40

Abkürzungen

AC =	Wechselstrom (alternating current)
AMoD =	autonome Mobilität auf Abruf (Autonomous Mobility on Demand)
ASTRA =	Bundesamt für Strassen
AV =	autonome Fahrzeuge (autonomous vehicle)
BEV =	Batteriebetriebes elektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle)
CCS =	kombiniertes Ladesystem AC/DC (Combined Charging System)
DC =	Gleichstrom (direct current)
EV =	Elektrische Fahrzeuge (electric vehicle)
NHTSA =	zivile US-Bundesbehörde für Strassen- und Fahrzeugsicherheit (National Highway Traffic Safety Administration)
PAV =	geteilte autonome Fahrzeuge (pooled autonomous vehicle)
SAE =	Verband der Automobilingenieure (Society of Automotive Engineers)
VBZ =	Verkehrsbetriebe Zürich

Bachelorarbeit Studiengang Bauingenieurwissenschaften

Auslegung der Ladeinfrastruktur für automatisierte elektrische Fahrzeuge am Beispiel Zürichs

Florian Mathys

Student ETHZ

Adresse:

Bülachstrasse 9c

8057 Zürich

Telefon:

+41 78 601 76 76

e-Mail-Adresse:

mathysf@student.ethz.ch

Dezember 2018

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Ladeinfrastruktur für einen Flottenbetreiber mit automatisierten elektrischen Fahrzeugen, im Speziellen mit den Kosten der Ladeinfrastruktur. Dazu steht eine Übersicht zum aktuellen Stand der Technik zu autonomen Fahrzeugen, elektrischen Fahrzeugen, möglichen Ladestationstypen und des Stromnetzes zur Verfügung. Weiter werden drei realistische Szenarien in und rund um Zürich vorgestellt, die in Zukunft eintreffen könnten. Für die Kostenschätzungen der Ladestationen und deren Anzahl, sowie dem daraus folgenden Massenrabatt, mussten Annahmen getroffen werden. Mithilfe von früheren Simulationsergebnissen zu Fahrdistanzen von autonomen Fahrzeugen und den zu den Ladestationen neu entstehenden zusätzlichen Leerkilometern werden die Anzahl der zurückgelegten Kilometer berechnet. Grosse Beachtung wird dabei der Flottengrösse, der Aussentemperatur und dem eigendefinierten Zeitraum in Form von Fallbeispielen zum Jahr 2018 und 2030 geschenkt. Die Kosten der Ladeinfrastruktur bewegen sich je nach Szenario und Fallbeispiel zwischen 1.37 und 4.02 Rp./km Fahrdistanz. Der Strompreis ist die massgebende Grösse.

Schlagworte

Kosten Ladeinfrastruktur, Selbstfahrende Taxis, Elektrische Fahrzeuge

Zitierungsvertrag

Mathys, F. (2018) Auslegung der Ladeinfrastruktur für automatisierte elektrische Ladeinfrastruktur am Beispiel Zürichs, Bachelorarbeit in Bauingenieurwissenschaften, IVT, ETH Zürich, Zürich.

1 Einleitung

In der heutigen Zeit testen immer mehr Fahrzeuganbieter und Verkehrsbetriebe autonome Fahrzeuge in verschiedenen Grössen und Varianten, die mit Elektrizität gespeist werden. Durch die vergangenen, aktuellen und zukünftigen Versuchsfahrten autonomer Fahrzeuge begutachten z.B. die Postauto AG mit dem Projekt "SmartShuttle" in Sion (Postauto, 2018), wie neue Mobilitätsangebote technisch und betrieblich machbar sind. Jedoch sind die Risiken, die Testfahrten im öffentlichen Raum durchzuführen, wesentlich höher als wenn diese in räumlich abgegrenzten Gebieten stattfinden (eMove360°, 2018b). Zuzüglich kann es bei einer öffentlichen Versuchsfahrt zu Zwischenfällen wie (NZZ, 2016, 2018) kommen, was zu negativer Publicity und zu einem Stopp der Testfahrten führen kann. Dafür eignen sich eigene Firmenbetriebsgelände umso mehr, wie es die Verkehrsbetriebe von Zürich (vbzonline, 2018a) nutzten, weil dort die Fahrzeuge keine Strassenzulassung besitzen müssen, sowie der Verkehr nicht komplex ist und die anderen internen Verkehrsteilnehmer informiert sind.

Die oben genannten Beispiele zeigen auf, dass in Zukunft mit grosser Wahrscheinlichkeit automatisierte elektrische Fahrzeuge auf unseren Strassen verkehren werden. Einen besonders interessanten Ansatz spiegeln die autonomen Taxis wieder. Bei autonomen Taxis, auch als Flotte selbstfahrender Fahrzeuge bezeichnet, werden gemäss Hörl et al. (2018b) ein Passagier samt ihm bekannter Personen von einem Dienstleister transportiert. Eine Variante davon sind die "pooled AV" (PAV). Bei diesem Konzept teilt der Nutzer das Fahrzeug mit ihm unbekannt Personen. Dabei sind beide Dienstleistungen sowohl geteilt ("shared"), als auch auf Abruf "on demand", verfügbar. Daraus ergibt sich der Oberbegriff autonome Mobilität auf Abruf (AMoD).

Zu den Vorteilen automatisierter Taxis gehören die tieferen Vollkosten, weil sie laut Hörl et al. (2018b) im städtischen Bereich für ungefähr 0.41 CHF pro Passagierkilometer den Service leisten können gegenüber den Privatfahrzeugen, die mit oder ohne Automatisierung 0.50 CHF pro Kilometer kosten. In den von Hörl et al. (2018b) durchgeführten Simulationen für eine Flotte automatisierter Taxis in Zürich besteht die grösste Nachfrage bei 3'000 Fahrzeugen mit einem Preis von 0.56 CHF / km, worin die Kosten für die Leerkilometer miteingerechnet werden. Der Kilometerpreis liegt also höher als bei Privatfahrzeugen, die mit oder ohne Automatisierung unterwegs sind. Deshalb lohnt es sich rein aus Kostengründen nicht eine Flotte mit 3'000 Fahrzeugen zu betreiben. Allerdings produzieren private automatisierte Fahrzeuge bis zu 250'000 Mehrkilometer pro Tag, während selbstfahrende Taxis bei ungefähr 25'000 km liegen, was

10 % entspricht (Hörl et al., 2018b). Aber wieso sieht die Zukunft der Mobilität automatisierte elektrische Fahrzeuge vor?

Einerseits elektrisch, weil fossile Brennstoffe, die unter anderem für Verbrennungsmotoren von konventionellen Fahrzeugen benötigt werden, endlich sind. Laut einer Statistik von BP (2017) aus dem Jahre 2017, reichen die bisher weltweit entdeckten Erdölreserven noch für weitere 50 Jahre. Deshalb macht es Sinn, eine alternative Energiequelle zu finden, um unseren Mobilitätsstandard aufrecht erhalten zu können. Dazu stellt sich die elektrische Energie als beste Option heraus, aber auch nur, wenn diese nicht aus fossilen Quellen wie Stein- und Braunkohle produziert wird. Als sinnvoller Ersatz bieten sich erneuerbare Energien an, z.B. Sonnen- und Windenergie, in der Schweiz aber vor allem die Wasserenergie. Ein zusätzlicher, ökologischer Grund ist, dass selbst wenn die Produktion des Stromgemisches mehr CO₂ als heute emittiert, sich der Gesamtausstoss des individuellen Personenverkehrs reduzieren lässt (Galus et al., 2013).

Da die Kapazität der Strassen immer mehr an ihre Grenzen stossen, können automatisierte Fahrzeuge durch smarte Kommunikation einen höheren Verkehrsfluss ermöglichen (Litman, 2014). Laut Bösch et al. (2018) können autonome Fahrzeuge wegen der höheren Flexibilität den letzten Streckenabschnitt von der ÖV-Haltestelle zur finalen Destination, die sogenannte letzte Meile, besser bedienen. Hinzukommend ist diese Art von Mobilität aus finanzieller Perspektive günstiger und sicherer als die heutigen Verkehrsmittel (Frazzoli et al., 2018).

Dennoch werden in Zukunft nicht alle Fahrzeuge auf der Strasse selbstfahrende Taxis sein. Preislich können die automatisierten Taxis nicht mit den öffentlichen Verkehrsmitteln mithalten und demzufolge kommt es zu keiner Konkurrenzsituation (Bösch et al., 2018b). Zudem bestätigten die Befragten in der Umfrage in Hörl et al. (2018b), dass sich die Anzahl an ÖV-Abonnements beinahe nicht verändert, egal welche Szenarien man betrachtet. Aber AVs könnten die nicht lohnenden Strecken des ÖV übernehmen (Frazzoli et al., 2018)), weil sie kostengünstiger sind, vor allem wenn die Fahrzeuge nicht komplett besetzt sind.

Doch wer hätte das Interesse eine Flotte automatisierter Taxis in Zürich zu betreiben? Dies könnten zum einen private Carsharing Anbieter wie Mobility, sowie halbprivate Firmen oder öffentliche Unternehmen wie die Verkehrsbetriebe Zürich sein. Förderlich wird auch sein, dass der Betreiber Kooperationen mit den benötigten, spezialisierten Firmen aufbauen kann.

Ausserdem sollte eine staatliche Überaktivität vermieden werden, jedoch könnte es hilfreich sein, wenn die Stadt oder der Kanton Betreiberkonzessionen verteilt (Fritzsche, 2018). Zurzeit fehlt allerdings unter anderem in der Schweiz eine entsprechende, ganzheitliche Strategie auf politischer Ebene. Immerhin erwähnt die Energiestrategie 2050 des Bundes die

Elektromobilität explizit als eine Massnahme zur Steigerung der Energieeffizienz des Strassenverkehrs und um die Abhängigkeit von Erdöl zu vermindern (ASTRA, 2018a).

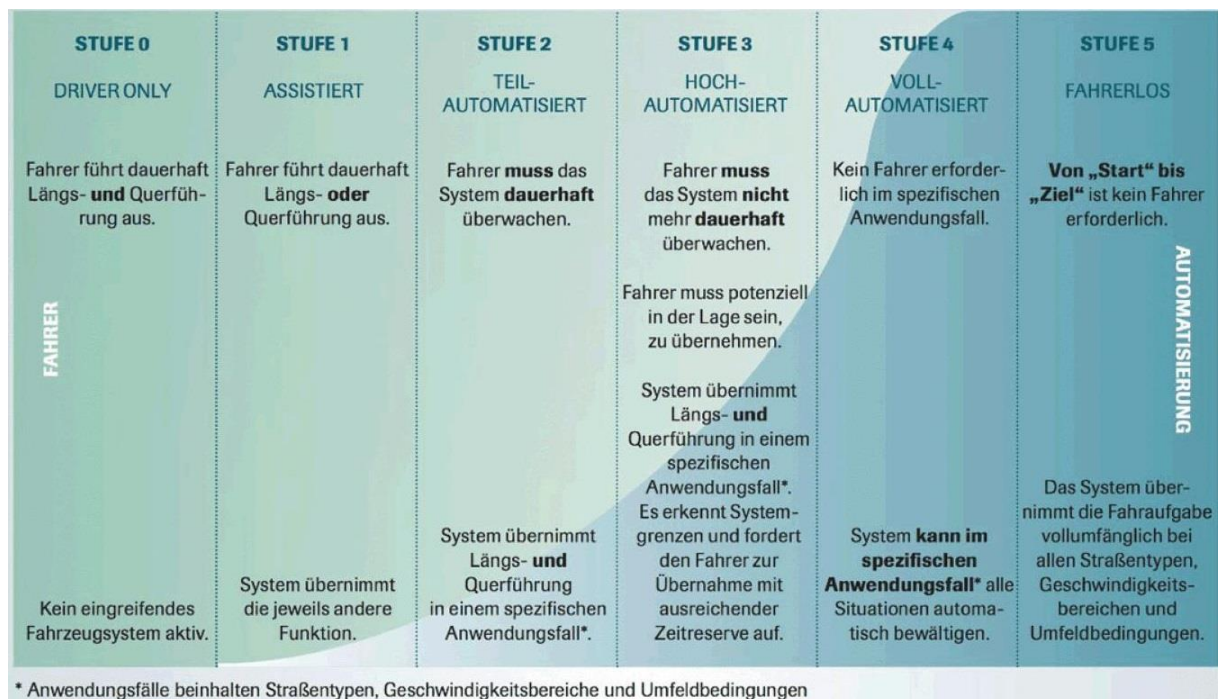
Bei bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten zu autonomen Fahrzeugen in Zürich wurden unter anderem die dynamische Nachfrage von automatisierten Taxis simuliert (Hörl et al., 2016), die Abhängigkeit der Umgebungstemperatur auf die Leistungsfähigkeit der Batterien überprüft (Belser Campero, 2017) und erste Annahmen zur Verteilung von Ladestationen getroffen (Bressan und Ganzmann, 2018). Aber die dazugehörige Ladeinfrastruktur wurde nie konkret und realistisch ausgearbeitet. Das Ziel dieser Arbeit ist eine Kostenübersicht, sowie eine strategisch sinnvolle Standortanalyse der Ladeinfrastruktur für einen Betreiber einer elektrisch autonomen Fahrzeugflotte in Zürich zu erstellen.

2 Literaturrecherche

2.1 Autonome Fahrzeuge

Der Automatisierungsgrad von Fahrzeugen wird je nach Institution in einer Skala von fünf (NHTSA, 2013) oder sechs (SAE International, 2016) verschiedenen Stufen unterteilt. Die drei Stufen 0 bis 2 sind in beiden Skalen gleich. Ab Stufe 3 überwacht das autonome System auch die Fahrzeugumgebung, jedoch verfeinert die SAE-Skala im Vergleich zur NHTSA-Skala die Stufen 3 und 4. Wie in Abbildung 2 ersichtlich sind das die Stufen 3 (hochautomatisiert), Stufe 4 (vollautomatisiert) und Stufe 5 (fahrerlos). Weil wichtige Akteure in Bezug auf autonome Fahrzeuge wie das ASTRA (ASTRA, 2018b) oder die VBZ (vbzonline, 2018b) die SAE-Skala verwenden, schätze ich diese zumindest national als relevanter ein.

Abbildung 2 Automatisierungsgrad von Fahrzeugen nach SAE 2016



Quelle: vbzonline (2018b)

Um sich ein Bild der Umgebung zu machen, werden autonome Fahrzeuge mit diversen Sensoren ausgerüstet. Dazu gehören Kameras, Laserscanner, Radar- und Ultraschallsensoren (BR, 2016), die die Umgebung nach Hindernissen, anderen Verkehrsteilnehmer, etc. abschnitten. Ein

Computer im Auto verarbeitet diese Signale und berechnet danach sogenannte Trajektorien (Buttelmann et al., 2000), durch welche das Fahrzeug schliesslich fahren sollte.

Ferner wird in der Literatur die autonome Mobilität als disruptive Kraft (Maunsell et al., 2014) angesehen, d.h. laut Hörl et al. (2018b), dass sich die Art und Weise, wie wir Mobilität verstehen und wie wir Städte planen, ändern kann. Denn gemäss Litman (2014) gewinnen wir bei der Fahrt mit autonomen Fahrzeugen an Komfort und erhalten die Möglichkeit, nützliche Aktivitäten auf den Reisen auszuüben. Weil die Fahrzeuge untereinander und zugleich mit der Verkehrsinfrastruktur (z.B. Lichtsignalanlagen) kommunizieren können, wird die Fahrt sicherer und vorausschaubarer (Hörl et al., 2018b). Da diese Vernetzung durch drahtlose Datenübertragung mit Funk und Internet geschieht, muss die Sicherheit vor Hackern gewährleistet werden. Technische Möglichkeiten für einen solchen Schutz bieten Firewalls, Virens Scanner oder eine gute Verschlüsselung (BR, 2016). Deshalb spielt der in den nächsten Jahren geplante Ausbau des 5G Mobilstandards eine zentrale Rolle, weil so mehr Bandbreite und schnellere Datenübertragungsgeschwindigkeiten ermöglicht werden (Merten, 2018).

Ebenso können die Fahrzeuge einen kleineren Sicherheitsabstand befolgen, woraus einen grösseren Verkehrsfluss entsteht und dies zu einer höheren Kapazität der Strasse führt (Hörl et al., 2018b). Jedoch wird es angesichts der induzierten Nachfrage (Hörl et al., 2018b) zusätzlicher Verkehr generiert. Ein möglicher Grund ist, dass mit autonomen Fahrzeugen jene Altersgruppen, die keinen Führerschein besitzen, einen neuen Anteil am Verkehrsfluss produzieren.

Angesichts der technischen Hilfsmittel kommt es zu weniger Unfällen, da u.a. die Reaktionszeit vom Computer kürzer ist als die des Menschen (Hörl et al., 2018b). Sofern die Wetterbedingungen wie Nebel keine Rolle spielen, kann der Computer immer aufmerksam die Umgebung absキャンen und wird nicht durch Dritte abgelenkt.

Zum heutigen Zeitpunkt sind aber noch viele Fragen für den Betrieb autonomer Fahrzeuge auf öffentlichen Flächen nicht abschliessend geklärt. Zuerst müssen noch rechtliche und versicherungstechnische Unklarheiten beseitigt werden. Wer übernimmt die Schuld, wenn autonome Fahrzeuge Eigentum beschädigen oder sogar Menschen verletzt werden (Chen, 2015)? Laut Engel (2018) kann man aber davon ausgehen, dass das geltende Haftungs- und Motorfahrzeugversicherungssystem nicht grundlegend verändert wird. Allerdings werden die Fahrzeughersteller bei einem Unfall, verursacht durch einen Technikfehler, in die Verantwortung genommen.

Wie soll ein AV in einer Situation handeln, indem ein AV z.B. das Leben von zwei gesetzestreuem Insassen und das Leben von zwei verkehrswidrigen Fussgängern abwägen muss. Für Awad et al. (2018), wurden dazu Umfragen veröffentlicht, die Menschen zu solchen moralischen Dilemmas konsultierte. Bei diesen Dilemmas werden die Befragten in Situationen gebracht, wo sie eine Gewichtung von Spezies, Quantität und Alter treffen müssen. Das Spannende daran ist, dass je nach kulturellen und geografischen Herkunft sich unterschiedliche Resultate ergeben. Welche soll in Zukunft gelten?

Laut Bierstedt et al. (2014) werden AVs bis 2040 in kontrollierten Umgebungen und ab 2050 auf öffentlichen Strassen unterwegs sein. Zurzeit existieren aber schon erste Teststrecken auf öffentlichen Strassen, wie z.B. in Deutschland auf der A9 zwischen München und Nürnberg mit einer Streckenlänge von 160 km (Merten, 2018). Dazu muss aber erwähnt sein, dass die autonomen Testfahrten im Alltagsverkehr nur mit Sicherheitsfahrer absolviert werden dürfen. In der Schweiz liegt eine weitere Hürde in der Politik. Eine Freigabe durch die Exekutive mit AVs Level 4 oder 5 zu fahren, wird voraussichtlich nicht vor 2022 kommen (vbzonline, 2018b).

2.2 Elektrische Fahrzeuge

Eine gute Übersicht, wie elektrische Fahrzeuge (EV) angetrieben werden können, bietet EBP (2018). Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Arten. Erstens als Range Extended Electric Vehicle (REEV), bei dem primär ein Elektromotor die Räder antreibt. Mit einem Generator, welcher durch einen kleinen Verbrennungsmotor angetrieben wird, kann der Elektromotor zusätzlich mit Strom gespeisen werden. Zweitens kann ein elektrisches Fahrzeug mit Hybrid-Antrieb (PHEV) gefahren werden. Dabei ist entscheidend, dass neben dem Verbrennungsmotor, die Batterie des Elektromotors extern aufgeladen werden kann. Als dritte Möglichkeit existieren die reinen Elektrofahrzeuge (BEV), bei welchen die Batterien extern geladen werden und die ohne Verbrennungsmotor auskommen. Ab diesem Punkt in der Arbeit werden unter "elektrischen Fahrzeugen" BEVs verstanden. Gemäss Electrosuisse (2018) liegt in der Schweiz der Marktanteil von EV bei 1.7 % und von BEVs bei knapp 3 ‰ (Stand 30.09.2017). Diese Werte übertreffen die in Galus et al. (2013) gemachten Prognosen, die in der Einführungsphase bis ins Jahr 2020 1 % EV vorhersagten.

Der entscheidende Faktor am Erfolg von Elektrofahrzeugen ist die Batterientechnik. Denn je höher die Energiedichte und Kapazität einer einzelnen Batteriezelle sind, desto höher liegt die Speicherleistung pro Kilogramm Batterie. Derzeit beträgt die durchschnittliche Energiedichte von 180 Wattstunden pro Kilogramm. Laut dem Magazin von Porsche Engineering (2018) kann

in Bezug auf den Energiegehalt von einer Steigerung von etwa 5 Prozent pro Jahr ausgegangen werden. Diese Entwicklung minimiert zudem die Reichweitenangst des Endkunden. Die im Moment und zukünftig dominierende Speichertechnologie sind die Lithium-Ionen-Batterien. Eine wichtige Vergleichsgrösse von Batterien ist die Speicherleistung in kWh. Gemäss EBP (2018) liegt der heutige Preis pro kWh bei 300 USD, wobei der Preis seit 2010 schon um 70 % gesunken ist und sich bis 2035 nochmals um 75 % auf 70 – 100 USD pro kWh reduziert. Dieser Fall der Preise ist sowohl mit der grossen Nachfrage nach Batterien als auch durch den technischen Fortschritt zu erklären. Weiter werden durch die hohe Nachfrage grössere Fabriken zum Herstellen der Batterien gebaut. In Tabelle 1 sind Annahmen zu vergangenen und zukünftigen Reichweiten und Speicherkapazitäten aufgelistet. Da für einen städtischen Flottenbetreiber eher kleinere Fahrzeuge in Frage kommen, werden als Fahrzeugkategorien Kompaktwagen (z.B. VW Golf) und Kleinwagen (z.B. Smart) verglichen. Als Gegenüberstellung werden auf dem Markt erhältliche BEVs verwendet, die dieselbe Fahrzeugkategorie angehören, wie z.B. BMW i3 und Nissan Leaf. Allerdings übertrifft das bekannteste BEV, der Tesla Model S, die Annahmen. Jedoch gehört dieses Modell einer höheren Fahrzeugkategorie an. Interpoliert man aber die Daten des Kompaktwagen aus den Jahren 2012 / 2020 und vergleicht sie mit denen vom BMW i3 und Nissan Leaf, sieht man, dass die gemachten Annahmen zutreffen. Besonders interessant ist, dass neben dem Wachstum der Speicherkapazität gleichzeitig der Verbrauch durch effizientere Antriebstechniken reduziert wird.

Tabelle 1 Entwicklung der Speicherkapazität und Reichweite

	2012	2020	2035	2050	2018 ¹	2018 ²	2018 ³
Kompaktwagen					Tesla	i3	Leaf
Speicherkapazität [kWh]	30	46	94	108	75	37.9	40
Verbrauch [kWh/100 km]	14.5	12.4	10.7	9.5	15.3	13.1	11.4
Reichweite [km]	207	371	879	1137	490	289	350
Kleinwagen							
Speicherkapazität [kWh]	20	31	63	72			
Verbrauch [kWh/100 km]	11.8	10.1	8.8	7.8			
Reichweite [km]	169	307	716	923			

Quelle: de Haan und Zah (2013), S.39/S.192

Ein grosser Nachteil von Lithium-Ionen-Batterien ist laut eMove360° (2018a) die kurze Lebensdauer von ca. 3000 bis 4000 Ladezyklen. Wenn es dann zwei bis drei Mal pro Tag zu einer Aufladung von automatisierten Taxis kommt, reicht die Lebensdauer der Batterie nur für drei bis vier Jahre. Das Fahrzeug an sich stösst in dieser Zeitspanne aber nicht an das Ende seines Lebens. Darum muss die Batterie entsorgt oder im optimalen Fall rezykliert werden, was zu weiteren Kosten führt, respektive bringt die Chemie der Batterien zusätzliche Umweltbelastungen mit.

Wegen des guten Gewissens mit einem Elektrofahrzeug unterwegs zu sein, kann sich ein sogenannter Rebound-Effekt (Schrader, 2017) einstellen. Durch das Bewusstsein etwas umweltschonendes zu tun, fährt man mehr Kilometer und schadet am Ende eher der Natur, als dass man ihr hilft. Ausserdem entsteht bei der Herstellung der Batterien je nach Fahrzeug zwischen 4.5 bis 20 Tonnen CO₂ (Leiva, 2017). Die CO₂-Bilanz fällt dadurch negativer aus als gedacht.

Der definitive Durchbruch von Elektrofahrzeugen ist noch nicht geschafft, da der Boom gemäss Bianchetti (2018) erst in vier bis fünf Jahren erwartet wird. Ein zusätzlicher Schub wird der von

¹ https://www.tesla.com/de_CH/models/design

² https://www.bmw.ch/de/bmw-neuwagen/bmw-i/i3/2017/at-a-glance.html?&bmwcache&bmw=sea:BMW_CH_DE:GSN_DE_Brand-Modelle_BMWi:Brand_BMWi_i3:g:bmw%20i3:e

³ <https://de.nissan.ch/fahrzeuge/neuwagen/leaf.html>

der EU verordnete neue CO₂-Grenzwert von 95 Gramm pro km geben, da die Automobilhersteller diesen nur mit PHEV und BEV einhalten können (Fuchs und Hügli, 2014). Wegen der vielen Unsicherheiten sind die Prognosen für den Fortschritt sehr breit gefächert. Gegenwärtig sind vor allem das fehlende Angebot, die hohen Anschaffungskosten, die fehlende Reichweite und das Henne-Ei Problem mit der Infrastruktur limitierend.

Hilfreich ist aber sicher die Förderung durch den Staat, welcher laut Bianchetti (2018) mit folgenden Rahmenbedingungen den Fortschritt der Elektromobilitätsbranche beschleunigen kann: Befreiung von der Automobilsteuer, weitere Verschärfung der CO₂-Emissionsvorschriften der Personenwagen, keine Mineralölsteuer, Energieetikette und Unterstützung bei der Koordination und Planung der Infrastruktur.

2.3 Elektrische Ladestationen

Fahrzeuggatterien werden wie jede andere Batterie mit Gleichstrom (DC) aufgeladen. Weil aber der Strom aufgrund von geringeren Verlusten als Wechselstrom (AC) transportiert wird, muss die Umwandlung von AC in DC entweder im Fahrzeug oder in der Ladestation geschehen (Bianchetti, 2018). Durch den Einbau des Umwandlungsgeräts im Fahrzeug, sind die BEVs schwerer und verbrauchen daher mehr Energie. Jedoch hat das Laden mit AC zum heutigen Zeitpunkt einen wesentlichen Vorteil. Die derzeitigen Besitzer von BEVs laden ihre Fahrzeuge aus Komfortgründen zu Hause auf, auch weil dort das Fahrzeug relativ einfach mit einer Wandsäule bei niedriger Leistung am Haushaltsstrom über mehrere Stunden angeschlossen bleiben kann (NPE, 2015). Ausserdem fehlt den Nutzern von BEVs das Bewusstsein, dass das Schnellladen mehr als nur Stromverkauf ist und deshalb vom Anbieter nicht nur der Strompreis verrechnet wird. Denn mit dieser höherwertigen Dienstleistung sind zusätzliche Infrastrukturkosten verbunden. Das führt zu einem klassischen Henne-Ei Problem (cash, 2017): Gibt es zu wenige Lademöglichkeiten, wird die Anzahl der EVs nur langsam steigen. Gibt es zu wenige Fahrzeuge, investiert niemand in die Infrastruktur.

Künftig müssen noch ein weltweiter Steckerstandard, ein gemeinsamer Kommunikationsstandard zwischen Ladestation und Fahrzeug und ein Bezahlstandard definiert werden. Bis heute zahlt der Kunde an der Ladestation A die Ladezeit pro Minute oder bei der Ladestation B die zugeführte Energiemenge.

Wie schnell ein EV aufgeladen werden kann, hängt vor allem von drei Faktoren ab. Dies sind das im Fahrzeug verbaute Ladegerät (On-Board Charger), die Ladestation und falls vorhanden, das Ladekabel. Der Bestandteil mit der kleinsten Ladeleistung bestimmt schlussendlich

die Gesamtleistung und somit auch, wie schnell geladen werden kann (Mobilityhouse, 2018). Die Formel für die Berechnung der Ladeleistung sieht folgendermassen aus:

$$\text{Ladeleistung [kW]} = \text{Anzahl Phasen} \cdot \text{Spannung [kV]} \cdot \text{Stromstärke [A]} \quad (1)$$

Die Anzahl Phasen spielt nur beim Aufladen mit Wechselstrom eine Rolle. Sonst kann diese als eins angenommen werden. Des Weiteren würde eine Erhöhung der bisherigen Infrastrukturspannung von 400 V auf 800 V eine merkliche Reduktion der Ladezeit zulassen (Reber, 2018).

Gemäss Porsche Engineering (2018) kann man eine Batterie aber nicht bis zu 100 % Ladezustand schnellladen. Bis zu 80 % ist es möglich, die restlichen 20 % müssen bei gedrosselter Leistung geladen werden. Dies hat einen elektrochemischen Grund. In Batteriezukunft (2018) wird er so begründet: „Je schneller Zellen geladen werden, desto weniger Elektrizität und chemische Energie nehmen sie auf. Durch die hohen Stromstärken kommt es beim Laden zu steigenden Innenwiderständen in den Zellen und in deren Folgen zu einer starken Wärmeentwicklung“.

Derzeit kristallisieren sich vier verschiedene Varianten heraus, um ein elektrisches Fahrzeug autonom aufladen zu können. Dies sind:

- Ladesäule nach Stecker-Kabel-Prinzip (ABB, 2018)
- Kabellos durch "Inductive Power Transfer (IPT)" (Wu, et al., 2011)
- Konduktives Laden (Easelink, 2018)
- Pantograph (Siemens, 2018)

Aus diesen Möglichkeiten kann man für den autonomen Betrieb einer Fahrzeugflotte, bestehend aus ein bis 15 Sitzplätzen, nur drei in Betracht ziehen. Die Pantographen Ladetechnik wird in Zukunft eher für Busse und Lastwagen eingesetzt, weil der Sicherheitsabstand zwischen ausstehendem Menschen und Strom bei grösseren Fahrzeugen höher ist.

2.3.1 Stecker-Kabel-Prinzip

Das Stecker-Kabel-Prinzip ist aktuell die am weitverbreitetste Möglichkeit ein EV aufzuladen. Man findet dieses System entweder in Kombination mit einer Wandsäule oder mit einer freistehenden Ladesäule. Bisher hat sich weltweit noch kein Steckerstandard durchgesetzt, in Europa etabliert sich aber der CCS, welcher einen AC sowie einen DC Anschluss besitzt und für kleinere Ladeleistungen vollständig abwärtskompatibel ist (Reber, 2018). Beim Stecker-Kabel-Prinzip für AVs kann ein Roboterarm, welcher an einer klassischen Ladesäule befestigt ist, die Verbindung zwischen Fahrzeug und Stromnetz herstellen.

Gemäss Bianchetti (2018) sind die Ladeaufnahmeleistung im Wechselstrombereich bei 22 kW limitiert, weil bei höheren Leistungen das Gewicht und die Ausmasse des Umwandlers einen zu hohen negativen Einfluss auf die Fahrzeugeigenschaften haben (Reber, 2018). Wie in Formel 1 erkennbar, kann man die Ladeleistung erhöhen indem man über alle drei AC-Phasen lädt. Dies ist vor allem in Zentraleuropa möglich, weltweit stehen aber oft nur ein oder zwei Phasen zur Verfügung (Zeyen, 2018).

Ladeleistungen von 100 kW und mehr sind laut Zeyen (2018) nur per Gleichstrom wirtschaftlich sinnvoll zu realisieren. Die gebräuchlichste Ladeleistung für das Schnellladen liegt derzeit um die 50 kW. In NPE (2015) wird prognostiziert, dass ab 2020 eine Ladeleistung von bis zu 350 kW möglich sein wird. Indessen hat aber Ionity (2018) erste Ladestationen in Frankreich eingeweiht, die die 350 kW DC-Leistung mit wassergekühlten Kabeln erreichen. Weil aber die anderen Ladekomponenten, wie die Batterie, für solche Leistungen noch nicht ausgelegt sind, ist der Nutzen bis zu diesem Zeitpunkt gering.

2.3.2 Induktives Laden

Was sich aber viel wahrscheinlicher durchsetzt, ist das induktive Laden. Bei diesem Vorgang muss das Auto sich über eine im oder am Boden befestigte Platte platzieren, so dass die Batterie kabellos aufgeladen werden kann. Das physikalische Prinzip wird in Wambsganss (2018) (S.23) auf folgende Weise erklärt: „Elektromagnetische Induktion nutzt Magnetfelder, um Energie von einer Primärspule zu einer Sekundärspule zu übertragen. Damit es effizient arbeitet, müssen sich die Spulen in direkter Nähe zueinander befinden und sorgfältig zueinander positioniert werden, sonst kommt es zu Verlusten. Grössere Abstände wie beispielsweise zwischen Bodenplatte und Auto oder nicht akkurat geparkte Fahrzeuge verhindern eine optimale Ladeleistung.“ Ein Nachteil ist, dass das kontaktlose Aufladen bis zu 12% weniger Energie überträgt als das Kabel (Plugless, 2018).

Auch beim induktiven Laden fehlt bis jetzt ein verbindlicher Standard, deshalb müsste für praktisch jeden Hersteller ein separater Induktionsplatz gebaut werden, was wirtschaftlich nicht zweckmässig ist (Porsche Engineering 2018). Zudem fehlt ein festgelegter Sicherheits- und Kommunikationsstandard, der z.B. Fremdobjekt-, Lebendobjekt- und Metallobjekterkennung sicherstellt.

Die Ladeplatte könnte man auch direkt in der Strasse verbauen, z.B. im Wartebereich von Lichtsignalanlagen. Aus finanzieller Sicht ist dieser hohe Aufwand nicht rentabel, ausser man konzipiert diese dynamischen Ladestrukturen für den öffentlichen Verkehr mit. In Braunschweig werden Busse schon an Haltestellen mit dem induktiven Verfahren aufgeladen (Emil, 2018).

2.3.3 Konduktives Laden

Eine alternative Variante die Batterie mit einer befestigten Platte aufzuladen, ist das konduktive Laden der Firma Easelink mit dem Verfahren Matrix Charging[®] (Easelink, 2018). Dabei stellt ein vertikal ausfahrender Schlauch, welcher am Unterboden des Vehikels montiert ist, die elektrische Verbindung zur Matrix der Aufladeplatte her. Ein Vorteil dieses Ladeverfahrens, ausser dass das Vorgehen autonom abläuft, ist, dass der Schlauch nicht exakt in Plattenmitte platziert werden muss. Es reicht auch aus, wenn der Kontakt mit der Matrix am Plattenrand stattfindet.

2.3.4 Kostenübersicht heutiger Ladestationen

Damit eine vernünftige Kostenschätzung gemacht werden kann, wägt man die heutigen Kosten (Ist-Zustand) ab und rechnet mit einem geschätzten Faktor, welcher die Entwicklungen berücksichtigt, die zukünftigen Kosten aus. Für eine einfache Überschlagsrechnung reicht es aber, einen groben Richtwert für die Kosten einer Schnellladestation 30'000 - 40'000 CHF anzunehmen (Feusi, 2018 und Sedlak, 2018).

Um eine Übersicht der Kosten von verschiedener Ladestationstypen zu erlangen, wurde Tabelle 2 erstellt. Dabei sind jeweils Preise für das Gerät (Hardware) an sich aufgelistet. In der unteren Hälfte der Tabelle wird ein Vergleich zwischen den Jahren 2015 und 2020 gemacht. Das Symbol (-) steht für fehlende Angaben. Trotzdem darf man mit den gegebenen Werten anderer Ladestationsarten eine Abschätzung treffen. Weil die Quellenangaben in Tabelle 2 zum Teil in Fremdwährungen bestimmt wurden, mussten die Zahlen zuerst in Schweizer Franken umgerechnet werden. Dabei wurde ein Wechselkurs (19.11.2018) von USD in CHF 1:1 und EUR in CHF 1:1,15 zugrunde gelegt.

Zusätzlich sind, falls vorhanden, die einmaligen Netzanschlusskosten, Genehmigung und Baukosten, sowie die jährlichen Wartungskosten angegeben. Bei den Netzanschlusskosten werden die benötigten Material- und die Arbeitskosten eingerechnet, um die Hardware am Kraftstromanschluss anzuschliessen. Falls aber kein brauchbarer Anschluss zur Verfügung steht und eine zusätzliche Transformationsstation gebaut werden muss, können die Kosten bis zu 172'500 CHF steigen (NPE, 2015). Unter Genehmigung fallen auch Kosten an, die bei der Planung und der Standortbestimmung entstehen. Zu den Baukosten werden auch die Montage und Beschilderung dazugerechnet. Die Kosten für den Roboterarm, damit das Ladeprinzip mit der Säule (Kapitel 2.3.1) autonom funktioniert, wurde hier nicht weiter berücksichtigt. Da der grösste Teil der Betriebskosten durch den Strompreis (Kapitel 2.4) verursacht wird und unabhängig vom Ladestationstyp ist, wird hier nicht näher darauf eingegangen. Die Netzanschluss-, Genehmigungs- und Baukosten bleiben über die Jahre konstant. Der Preis für die Hardware lässt sich bis zu einem Faktor von 0.5 reduzieren, respektive man bekommt für den gleichen Preis mehr Leistung, weil die Nachfrage die Forschung antreibt. Generell kann davon ausgegangen werden, dass je mehr Leistung die Ladestation haben soll, desto höher werden die Kosten. Dies gilt auch für die Kosten, die nicht die Ladehardware betreffen. Denn für mehr Leistung braucht es z.B. dickere und teurere Kabel, grössere Standflächen, mehr Elektronik, dickere Fundamente. Bei den Hardwarekosten von der Ladesäule ABB Terra 54 HV muss beachtet werden, dass darin eine Ladeinheit für DC und AC eingebaut ist.

Tabelle 2 Kostenübersicht ausgewählter Ladestationen [CHF]

	Induktion 3.6 kW ^a	Induktion 7.2 kW ^a	Konduktives Laden 11 kW ^b	Ladesäule Smart N 22 22 kW ^c
Hardware	5'999	12'999	< 1'150	10'440
Netzanschlusskosten	(-)	(-)	(-)	verschieden
Genehmigung	(-)	(-)	(-)	3'000
Baukosten	(-)	(-)	(-)	10'000
Wartungskosten	(-)	(-)	(-)	600

Jahr	Ladesäule AC 11 oder 22 kW ^d		Ladesäule DC 50 kW ^d		Ladesäule ABB Terra 54 HV 50/43 kW ^c
	2015	2020	2015	2020	
Hardware	5'750	2'875	28'750	17'250	43'000
Netzanschlusskosten	2'300	2'300	5'750	5'750	verschieden
Genehmigung	1'150	1'150	1'725	1'725	5'000
Baukosten	2'300	2'300	4'025	4'025	20'000
Wartungskosten	(-)	(-)	(-)	(-)	1'000

Quelle: Grundlage Tabelle 1 NPE (2015)
^a <https://www.pluglesspower.com/shop/>
^b Easelink (2018)
^c Private Kommunikation, M. Mayer Alpiq E-Mobility, 02.11.2018
^d NPE (2015)

Was nicht weiter betrachtet wurde sind Hotline-, Landerwerbe-, Entsorgungs-, Kommunikations-, Abrechnungs- und IT-Systemkosten, welche aber meist vernachlässigbar sind.

Falls die elektrische Ladeinfrastruktur im grossen Massstab aufgebaut werden soll, darf man als Käufer, wie in der Industrie üblich, von einem Massenrabatt profitieren. Weil in der Literatur dazu nichts gefunden wurde, wurden sinnvolle Annahmen getroffen und in Tabelle 3 aufgelistet. Bei den Annahmen wurde sowohl auf eine Abstufung der Rabatte geachtet, als auch dass der Hardwareproduzent genug verdient. Die Rabattprozente gelten so nur auf die Hardware, denn die anderen Kosten sinken durch die Massenproduktion nicht stark.

Tabelle 3 Massenrabatt

Stückzahl	Rabatt [%]
10	10
20	15
50	20
100	30
200	35
500	40

2.4 Stromnetz

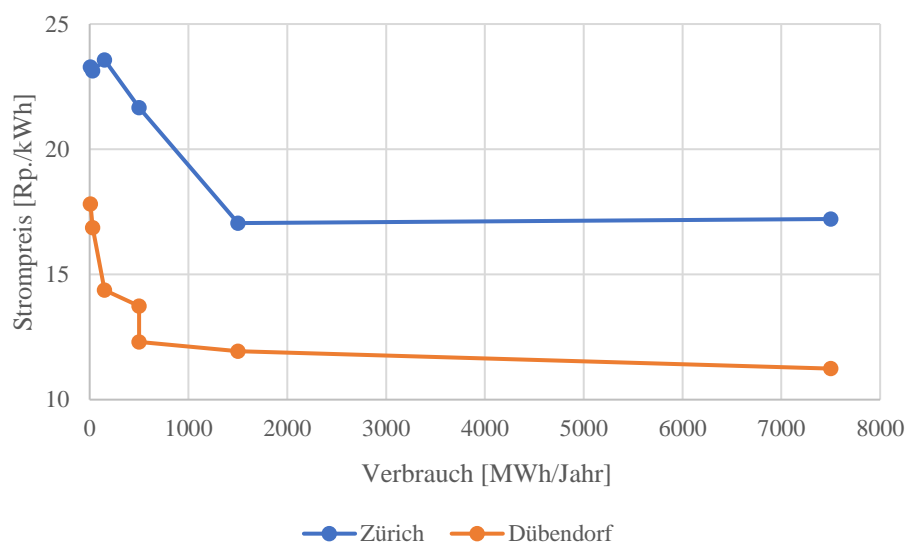
Im jetzigen Zustand sind die Verteilnetze in der Stadt Zürich, genauso wie die des ganzen Kantons, sehr gut ausgebaut. Auch bei einem starken Zuwachs der Elektromobilität und den daraus folgenden Mehrbedarf von 4 GWh an Strom pro Tag (Galus et al., 2013), kommt das Netz grundlegend nicht an seine Grenzen. Jedoch können in gewissen Gebieten der Stadt punktuell einige Ausbauten notwendig werden, wie z.B. zusätzliche Trafostationen, zusätzliche Leitungen oder grössere Querschnitte⁴. Im Gegensatz zur Menge an Strom, können Leistungsspitzen, die durch die hohe Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen entstehen, zu kurzzeitigen Problemen führen. Gemäss EBP (2018) wird die zeitgleiche Höchstlast bis in Jahr 2035 0.8 GW und bis 2050 1.6 GW betragen. Eine mögliche Lösung wäre Smart Charge (EBP 2018). Bei diesem Konzept geben durch erneuerbare Energien aufgeladene, stationäre Batterien ihre gespeicherte Energie ans Stromnetz zurück. Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) prüft wie die Intelligenz der Ladestationen genutzt werden könnte um die Leistungsspitzen zu verkleinern ohne dass ein grosser konventioneller Netzausbau getätigt werden muss. Die Ansteuerung der Lasten kann auch als Übergangslösung funktionieren, um evtl. mögliche Synergien mit TAZ (Tiefbauamt der Stadt Zürich) Projekten nutzen zu können. Die Leistungsspitzen des Strombedarfs würden in unserem Szenario jeweils nach den in Hörl et al. (2018) publizierten Spitzenzeiten (06:30 – 09:00 und 16:30 – 18:30) der autonomen Taxis auftauchen.

Damit in Kapitel 4 eine Kostenschätzung durchgeführt werden kann, wird der Strompreis in Abbildung 3 aufgezeigt. Der Strompreis wird im Allgemeinen zum Hoch- und Niedertarif angeboten. In der Stadt Zürich ist der Hochtarif von Montag bis Samstag von 06:00 – 22:00 gültig,

⁴ Private Kommunikation, Michael Auer EWZ, 01.10.2018

in der restlichen Zeit gilt der Niedertarif (ewz, 2018). Auf der Webseite der eidgenössischen Elektrizitätskommission (EICoM, 2018) kann der durchschnittliche Strompreis für jede Gemeinde im Jahr 2018 für unterschiedliche Verbraucherprofile angezeigt werden. In unserem Fall interessieren uns die Kosten der Gewerbe- und Industriebetriebe für die Stadt Zürich und Dübendorf. Weil der Stromverbrauch einer Flotte viel höher ist als die Skala in Abbildung 3, wird für die Stadt Zürich ein Strompreis von 17 Rp. / kWh, respektive für Dübendorf 11 Rp. / kWh angenommen. Die Differenz entsteht dadurch, dass die Leistungsdichte in einer Grossstadt viel grösser ist und deshalb höhere Infrastrukturkosten entstehen.

Abbildung 3 Strompreis



Quelle: EICoM, 2018

2.5 Flottengrösse und Strategie

Die Flottenstrategie entscheidet darüber, wie effizient ein Flottenbetreiber seine AVs einsetzen kann. Laut Hörl et al. (2018a) hat die Repositionierung von freien Fahrzeugen einen grossen Einfluss auf die Wartezeiten und deren Kosten. Dabei kann das Vehikel wegen der Kommunikationsfähigkeit mit anderen Fahrzeugen den Wiederausgleich alleine und effektiv lösen, wobei die Fahrzeit und Wartezeit reduziert wird.

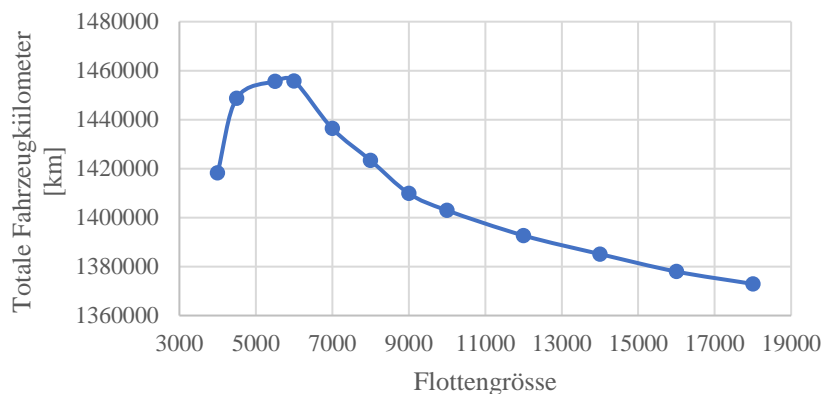
Generell führt eine grössere Flotte zu kürzeren Wartezeiten, weil mehr Fahrzeuge vorhanden sind (Hörl et al., 2018a). Gemäss Hörl et al. (2018b) kann der Reisebedarf mit einer

Flottengrösse von 10 % des aktuellen Fahrzeugbestandes gedeckt werden. In der Stadt Zürich waren im Jahr 2017 136'589⁵ Personenwagen registriert, d.h. es müssten 13'659 AVs existieren. Unter Idealbedingungen reicht in Hörl et al. (2018a) schon eine Flottengrösse von 7'000 AVs damit in 90 % der Fälle eine akzeptable Wartezeit von 5 min eintrifft.

Damit in Kapitel 4 eine quantitative Analyse durchgeführt werden kann, werden die Daten aus Abbildung 4 und 5 verwendet. Diese Daten stammen aus Simulationsergebnissen von Hörl et al. (2018a), wobei die Reisen von AVs über einen ganzen Tag auf dem Stadtgebiet von Zürich simuliert wurden. Bei den Simulationen wurde von einer maximalen Nachfrage ausgegangen, d.h. alle Reisen innerhalb der Stadtkreise wurden in AVs mit Platz für einen Passagier absolviert. Der Betreiber dieser Flotte hat eine Gewinnmarge von 3 % (Hörl et al., 2018a).

In Abbildung 4 wurde die totalen Fahrzeugkilometer mit der Flottengrösse verknüpft. Die totale Fahrtdistanz ist die Summe aus der Kundendistanz und den Leerkilometern. Bei der Kundendistanz befindet sich jeweils ein Passagier im AV, während die Leerkilometer durch den Wiederausgleich entstehen. Die totale Fahrtdistanz steigt bis zur Flottengrösse von 6'500 an, nimmt danach wegen den schrumpfenden Leerkilometer wieder ab.

Abbildung 4 Totale Fahrzeugkilometer



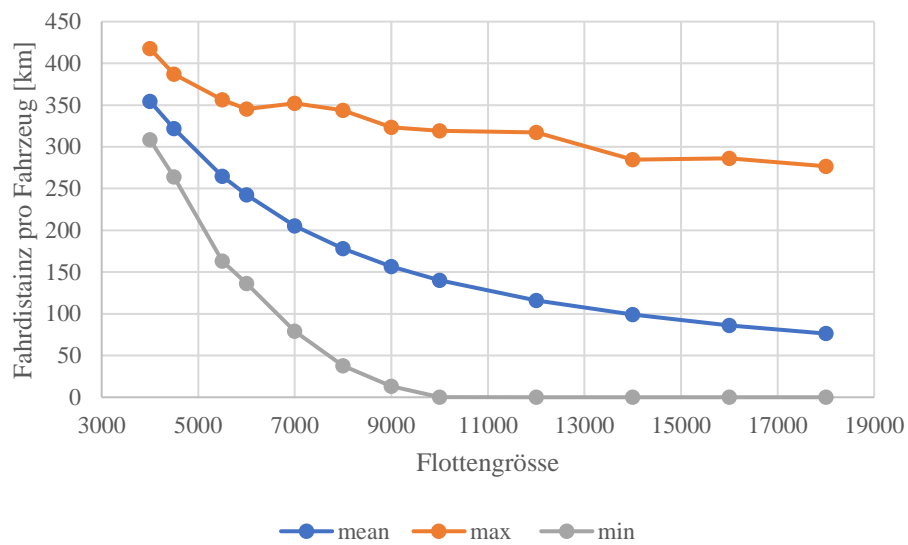
Quelle: Hörl et al. (2018a)

Da in den Simulationen von Hörl et al. (2018a) pro Flottengrösse nicht alle AVs die gleiche Fahrtdistanz zurücklegen, wurde in Abbildung 5 eine detailliertere Übersicht der

⁵ Private Kommunikation, Statistisches Amt des Kantons Zürich und Strassenverkehrsamt des Kantons Zürich, 18.10.2018

Fahrzeugkilometer pro Fahrzeug dargestellt. Dabei wurde jeweils pro Flottengrösse die minimale, maximale und der durchschnittliche Wert eines Fahrzeuges abgebildet. Besonders interessant ist vor allem, dass ab einer Flottengrösse von 10'000 Fahrzeugen, gewisse AVs gar keine Strecken mehr zurücklegen und ungenutzt bleiben.

Abbildung 5 Fahrdistanz pro Fahrzeug



Quelle: Hörl et al. (2018a)

3 Erarbeitung der zukünftigen Szenarien

In diesem Kapitel werden Standorte für eine mögliche Ladeinfrastruktur für einen Flottenbetreiber in und rund um die Stadt Zürich qualitativ untersucht, weil dazu Daten bezüglich Fahrdistanzen verfügbar sind. In der Literatur werden die Standorte mit mathematischen und stochastischen Verteilungen angegeben (Wang et al. 2010, Lam et al. 2014), aber nie aus politischer oder städteplanerischer Sicht analysiert. Dabei standen grundsätzliche Fragen im Raum, z.B. wo überhaupt eine Ladeinfrastruktur gebaut werden darf oder welche bestehenden Infrastrukturen wegen AVs nicht mehr benötigt werden.

Laut dem Zonenplan der Stadt Zürich muss eine geplante Ladestation innerhalb einer Bauzone liegen und darf somit nicht in einer Freihalte-, Erholungs- oder Landwirtschaftszone gebaut werden. Optimale Standorte wären sogenannte *Point of Interest* (POI) wie Bahnhöfe, Flugplätze, Parkplätze & Parkhäuser, Hotels, Restaurants, Kinos, Einkaufszentren, Supermärkte oder Stadien. Zusätzlich könnten auch zukünftige 2000-Watt-Areale als Standort attraktiv sein.

Schlussendlich wurde aus etlichen Standortvarianten der Fokus auf 3 Szenarien gelegt. Dazu gehört das Szenario „Tankstelle“, wobei das Tankstellennetz untersucht wird. Als zweite Variante wird das Szenario „Parkhaus“ betrachtet, bei dem die öffentlichen Parkhäuser der Stadt Zürich betrachtet werden. Als Drittes wird das Szenario „Innovationspark Dübendorf“ analysiert, der sich auf dem Flugplatzgelände von Dübendorf befindet. Eine nicht weiter untersuchte Option wäre eine Umfunktionierung von grossen Parkplatzflächen gewesen, diese würden aber in Zukunft besser als Parks und Grünflächen dienen. Zudem wären die AVs während dem Aufladen der Witterung ausgesetzt, weshalb zusätzlich eine Bedachung gebaut werden müsste.

Der benötigte Landerwerb wurde nur qualitativ betrachtet, weil dieser lokal hohe Differenzen aufweist und somit eine grosse Anzahl von Fallunterscheidungen mit sich ziehen würde. Ausserdem wären viele Flottenbetreiber wahrscheinlich nicht bereit, eine solch hohe Investition alleine zu tätigen und wären auf Hilfe in Form von Subventionierungen von Stadt, Kanton oder Bund angewiesen.

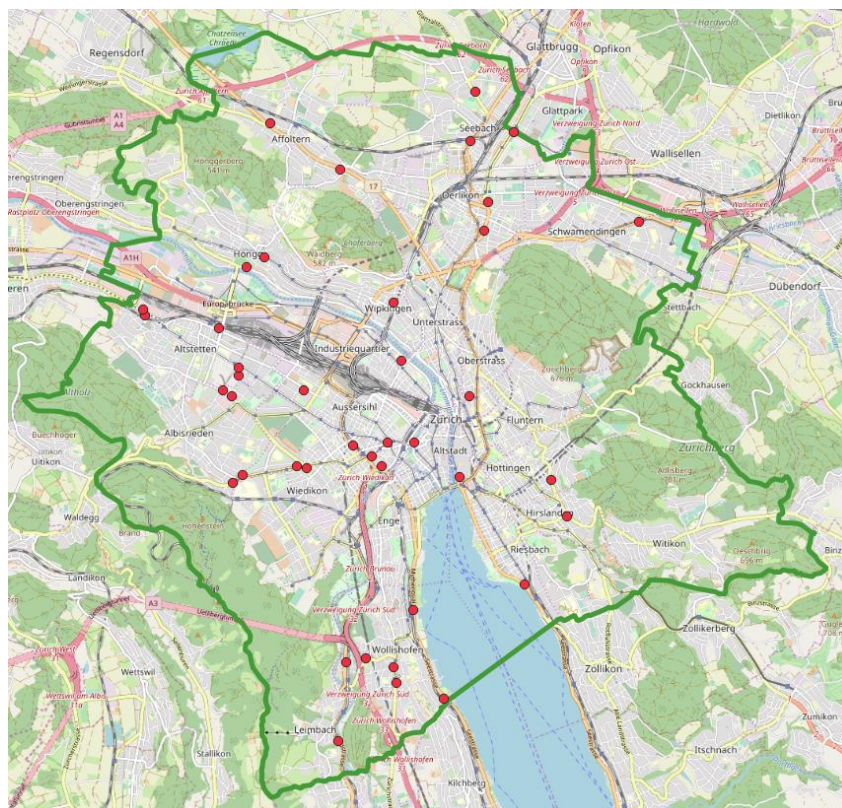
Für alle Szenarien wurden die Koordinaten der möglichen Standorte in QGIS mit der Hintergrundkarte von Open Street Map veranschaulicht. Zur Verdeutlichung wurde jeweils die Stadtgrenze mit grüner Farbe markiert. Wie ein einzelner Standort bezüglich Design und Integrität genau aussehen wird und welche Standorte in Zukunft effektiv verwendet werden können, wurde nicht genauer analysiert. Jedoch wird die benötigte Grundfläche für eine autonome Aufladeeinheit, welche stark von den geometrischen Dimensionen der Fahrzeuge abhängen wird, ungefähr 2.3 m mal 5 m (=11.5m²) sein (AGVS 2014).

3.1 Szenario Tankstelle

Wie in Frick et al. (2007) wird bei diesem Szenario das Tankstellennetz untersucht, im Fokus aber steht das Stadtgebiet von Zürich und nicht die ganze Schweiz. Die aus dem Jahr 2014 stammenden Daten vom Bundesamt für Statistik zeigen in Abbildung 6 die einzelnen Tankstellenstandorte auf. Dabei ist gut ersichtlich, dass die 41 Standorte (rosa Punkte) über alle Stadt- kreise gut verteilt sind. Nicht beachtet wurden kleinere Werkstatttankstellen, die auch nur ma- ximal ein bis zwei Tanksäulen anbieten.

Die Idee ist, dass in Zukunft die nicht mehr verwendeten, fossilen Treibstoff anbietenden Tank- stellen, Platz machen für drei bis sechs Ladestationen pro Standort. In Summe würden dies 123 bis 246 Ladestationen ergeben, wobei ein AV für das Aufladen ungefähr im Umkreis von 1 km im Idealfall immer eine Ladestation auffinden würde. Ob an gewissen Standorten die Nachfrage nach Aufladungen grösser ist als das Angebot und ein AV dadurch zu einem weiter entfernten Standort fahren muss, wurde nicht betrachtet. Die Landerwerbskosten sind in diesem Fall eher hoch, weil die Grundfläche der Tankstellen nicht der öffentlichen Hand gehört.

Abbildung 6 Standort Tankstellen



Quelle: Bundesamt für Statistik (2014) für die Tankstellen

3.2 Szenario Parkhaus

Die Menge an Parkhäuser, wie sie heutzutage vorhanden sind, wird mit der Einführung von AVs nicht mehr gebraucht. Die grossen, öffentlichen Parkhäuser könnten in der Stadt Zürich als Standorte für Ladestationen umfunktioniert werden. In Tabelle 4 sind einige Parkhäuser, deren Anzahl öffentliche Parkplätze und deren Grundfläche aufgelistet. Neben den öffentlichen Parkplätzen werden zusätzlich private Parkplätze an umliegende Gewerbebetriebe und Anwohner vermietet.

Tabelle 4 Öffentliche Parkhäuser in der Stadt Zürich

Parkhausname	Anzahl öffentliche Parkplätze ^a	Grundfläche [m ²] ^b
Hohe Promenade	497	18500
Urania	451	18000
Hardturm	270	10500
Hauptbahnhof	176	6000
Feldegg	147	8500
Hardau 2	113	34500
Dorflinde	48	4500
Central	40	1180
Vorderberg	20	4000
A-Park	74	-
Hallenstrasse Zürichhorn	65	-
Albisriederplatz	65	-
Rämibühl	35	-

Quellen:

^a <https://parkingzuerich.ch/parkhaeuser/alle-standorte/>

^b Private Kommunikation mit J. Trakilovic, Parking Zürich AG, 19.11.2018

Laut Zürich (2018) vermietet die Stadt Zürich den Rohbau der Parkhäuser Hohe Promenade, Hauptbahnhof, Feldegg, Hardau 2, Vorderberg, Dorflinde und Hardturm an die Parking Zürich AG. Dabei ist die Stadt für tragende Strukturen und die Gebäudehülle zuständig und die Parking Zürich AG für alle laufenden Kosten und den Unterhalt verantwortlich. Für den Erwerb der Grundflächen kann ein Flottenbetreiber auf die Kulanz der Stadt hoffen. Die Parkhäuser Albisriederplatz, A-Park und Rämibühl werden zwar durch die Parking Zürich AG betreut, aber die

Parkhäuser Albisreiderplatz und A-Park gehören der Baugenossenschaft Zurlinden und das Parkhaus Rämibühl der MNG Rämibühl⁶.

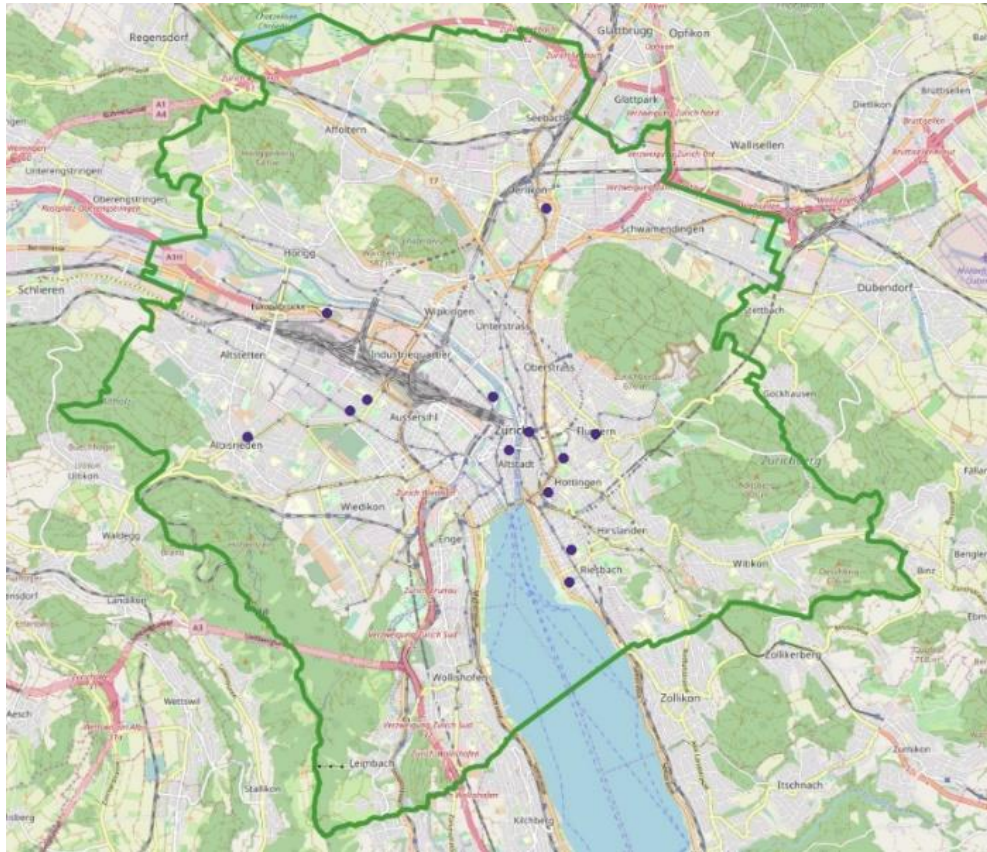
Mittels der swisstopo⁷ Karte wurden die Standorte der Parkhäuser im schweizerischen Koordinatensystem LV95 festgestellt. Danach wurden die Koordinaten mithilfe von QGIS in Abbildung 7 dargestellt. Dadurch sieht man, dass die meisten Parkhäuser, welche mit violetten Punkten markiert wurden, sich im inneren Stadtkern befinden. Zusätzlich findet man einzelne Parkhäuser in den peripheren Stadtgebieten vor. Ob alle Ladestationen in einem einzigen Parkhaus oder in mehreren Parkhäusern aufgeteilt werden, wurde nicht ausführlich betrachtet. Für die Hin- und Rückfahrt zur Ladestation werden pro Weg zusätzliche 4 km an Leerkilometer angenommen.

Weil die Mehrzahl der Parkhäuserrohbauten der Stadt gehören, könnte ein zukünftiger Flottenbetreiber für eine Umfunktionierung der Parkhäuser auf eine städtische Subventionierung hoffen. Dies könnte in Form von einer Kürzung oder sogar einem Wegfallen der Mietkosten geschehen. Ein weiterer Vorteil durch die Umfunktionierung wäre, dass die Fahrzeuge während dem Aufladevorgang vor der Witterung geschützt sind. Darüber hinaus liegt die aktuelle Durchschnittsbreite der Parkplätze bei 2.30 m (SRF, 2016), was gerade der optimalen Breite der Grundfläche einer Aufladeeinheit entspricht.

⁶ Private Kommunikation, J. Trakilovic Parking Zürich AG, 19.11.2018

⁷ <https://map.geo.admin.ch/?topic=swisstopo&lang=de&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe>

Abbildung 7 Standort Parkhäuser



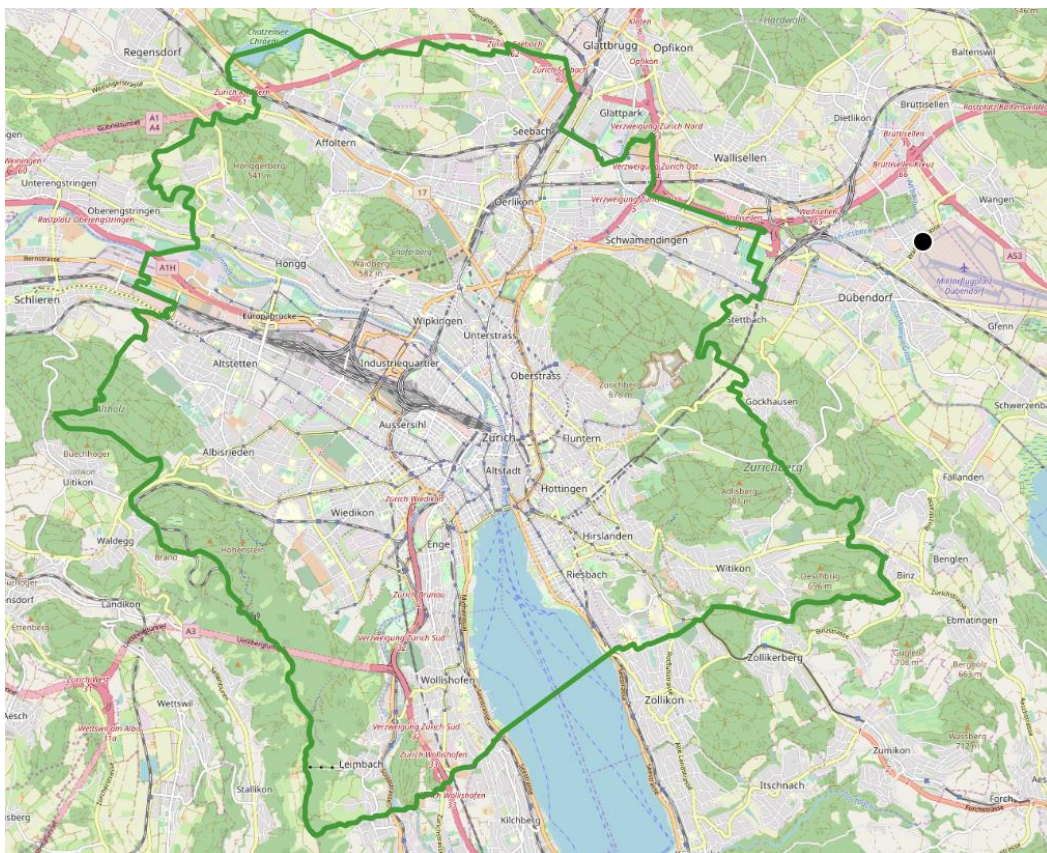
Quelle: <https://parkingzuerich.ch/parkhaeuser/alle-standorte/>

3.3 Szenario Innovationspark Dübendorf

Auf dem Flugplatzgelände von Dübendorf entsteht in den nächsten Jahren ein Innovationspark mit dem Zweck, dass die Zürcher Hochschulen und die Wirtschaft gemeinsam an Innovationen forschen können (Switzerland Innovation, 2018). Die Symbiose von diesem Umfeld kann deshalb für die Integration einer Ladeinfrastruktur genutzt werden, weil die Idee auch als innovativ gilt und sich Forschungen zu diesem Thema anbieten.

Wie in Abbildung 8 ersichtlich ist, liegt der mit einem schwarzen Punkt markierten Innovationspark Dübendorf ausserhalb vom Zürcher Stadtgebiet. Daraus resultiert auch, dass die Selbstfahrenden Taxis für das Aufladen Leerkilometer machen. Hier werden für die Hin- und Rückfahrt jeweils 12 km angenommen, in Summe also 24 km. Zwei grosse Vorteile in diesem Szenario sind der bis zu 6 Rappen günstigere Strom und falls nötig, der günstigere Quadratmeterpreis für den Landerwerb.

Abbildung 8 Standort Innovationspark Dübendorf



4 Quantitative Analyse

Um die verschiedenen Szenarien aus Kapitel 3 zu bewerten, wurde jeweils eine Kostenberechnung durchgeführt. Die Kosten eines Flottenbetreibers setzen sich aus den Flottenfahrzeug- und den Ladeinfrastrukturkosten zusammen. In dieser Arbeit werden aber nur die Kosten für die Ladeinfrastruktur näher betrachtet. Die Kosten werden in Rp. pro Kilometer Fahrdistanz angegeben. Da die Entwicklung von Fahrzeugen und Ladestationen fortschreitet, werden für die verschiedenen Szenarien jeweils ein Fallbeispiel für das Jahr 2018 und für 2030 untersucht.

4.1 Annahmen

Die Aussentemperatur hat einen grossen Einfluss auf die Reichweite eines Fahrzeuges. Gemäss (Belser Campero, 2017) reduziert sich die Reichweite pro °C unter 22 °C um 2 km. In den Berechnungen werden 2 verschiedene Fälle betrachtet:

- 1. Fall: Aussentemperatur 22 °C
- 2. Fall: Aussentemperatur -10 °C

Beim 1. Fall handelt es sich um den Idealfall, bei dem es keine Reduktion der Reichweite gibt. Im Gegensatz dazu der 2. Fall, wobei die Reduktion der Reichweite 64 km beträgt.

Die zusätzlichen Leerkilometer (=ZL) für die verschiedenen Szenarien sind:

- Szenario Tankstelle: ZL = 2 km
- Szenario Parkhaus: ZL = 8 km
- Szenario Innovationspark: ZL = 24 km

Die in Kapitel 4.3 und 4.4 angenommene Flottengrösse beträgt 4'000 Fahrzeuge, weil diese Anzahl am nächsten der Anzahl der grössten Nachfrage kommt.

Da wir von Idealbedingungen ausgehen, wird der genaue Standort einer Ladestation nicht berücksichtigt, sondern nur die totale Anzahl der Ladestationen pro Szenario.

4.2 Formeln

Mit Formel 2 kann der Verbrauch vom Musterfahrzeug berechnet werden.

$$VER = \frac{SB}{TR} \quad (2)$$

VER = Verbrauch [kWh/100 km]

TR = Theoretische Reichweite [km]

SB = Theoretische Speicherkapazität Batterie [kWh]

Die Selbstfahrenden Taxis kommen mit 10 % Ladezustand bei der Schnellladestation an und verlassen diese mit 80 % Ladezustand wieder. Die resultierende aufgenommene "Strommenge" folgt aus Formel 3.

$$AS = 0.8 \cdot SB - 0.1 \cdot SB = 0.7 \cdot SB \quad (3)$$

AS = aufgenommene "Strommenge" [kWh]

Da jetzt der Verbrauch und die aufgenommene "Strommenge" bekannt sind, ergibt sich aus Formel 4 die effektive Reichweite.

$$ER = \frac{AS}{VER} \quad (4)$$

ER = effektive Reichweite [km]

Zudem kann mit Formel 5 die Ladezeit an der Station berechnet werden.

$$LZ = \frac{AS}{LL} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \quad (5)$$

LZ = Ladezeit [min]

LL = Ladeleistung [kW]

Anhand der Flottengrösse und der im Anhang 2 berechneten Anzahl Ladevorgänge pro Fahrzeug und Tag kann mit Formel 6 die totale Anzahl Ladevorgänge pro Tag herausgefunden werden.

$$TLV = FG \cdot FLV \quad (6)$$

FG = Flottengrösse

FLV = Anzahl Ladevorgänge pro Fahrzeug und Tag

TLV = Totale Anzahl Ladevorgänge pro Tag

Aus Formel 7 resultiert die Anzahl Ladestationen, die ein Flottenbetreiber bauen sollte. Aus Kapitel 4.3 / 4.4 stammt die Kapazität der Ladestation pro Tag. Diese wird anhand der Ladezeit pro Fahrzeug auf einen ganzen Tag hochgerechnet.

$$LS = \frac{TLV}{FS} \quad (7)$$

LS = Anzahl Ladestationen

FS = Kapazität Ladestation pro Tag [Fahrzeuge/d]

Mit den aus Anhang 3 geschätzten Kosten pro Ladestation und Formel 8 können die totalen Kosten aller Ladestationen pro Tag berechnet werden.

$$TKLA = \frac{KLA \cdot LS}{3650 \frac{Tage}{10 Jahre}} \quad (8)$$

TKLA = Totale Kosten aller Ladestationen pro Tag [CHF/d]

KLA = Kosten pro Ladestation über 10 Jahre [CHF]

Mit den Strompreisen aus Abbildung 3 und der Formel 9 erhält man die Stromkosten pro Tag.

$$SK = AS \cdot TLV \cdot SP \quad (9)$$

SK = Stromkosten [CHF/d]

SP = Strompreis [Rp./kWh]

Die effektive totale Fahrdistanz in Formel 10 setzt sich aus der totalen Fahrdistanz und den zusätzlichen Leerkilometer zusammen.

$$EFD = TFD + TLV \cdot ZL \quad (10)$$

EFD = Effektive totale Fahrdistanz [km]

TFD = Totale Fahrdistanz [km]

ZL = zusätzliche Leerkilometer [km]

Die Kosten der Ladeinfrastruktur errechnet sich gemäss Formel 11 aus der Summe der Kosten geteilt durch die effektive totale Fahrdistanz.

$$KL = \frac{TKLA + SK}{EFD} \cdot 100 \quad (11)$$

KL = Kosten Ladeinfrastruktur [Rp./km]

4.3 Fallbeispiel 2018

Für das Fallbeispiel 2018 werden zuerst Berechnungen durchgeführt, die für alle 3 Szenarien nach dem gleichen Schema funktionieren. Danach werden die Rechnungen pro Szenario vorgestellt. Jeder Rechnungsschritt wird einmal detailliert erklärt und bei den folgenden Malen werden nur noch die Resultate tabellarisch dargestellt.

Für die Dimensionierung der Fahrzeuge wird mit den Kennwerten der aufgelisteten Fahrzeuge aus Kapitel 2.1 der durchschnittliche $TR = 376$ km und $SB = 51$ kWh berechnet. Aus Formel 2 folgt $VER = 13.6$ kWh/100 km. Da unser AV mit einem Ladezustand von 10 % bei der Ladestation auflädt und die Station mit 80 % Ladezustand wieder verlässt, kann mit Formel 3 $AS = 35.7$ kWh berechnet werden. Weiter kann mit Formel 4 die effektive Reichweite im 1. Fall auf 262.5 km und im 2. Fall auf 198.5 km bestimmt werden.

Heutige Schnellladestationen können im Idealfall mit Gleichstrom und einer $LL = 50$ kW ein Fahrzeug aufladen. Anhand Formel 5 findet man heraus, dass die Ladestation dafür 42.8 min benötigt. Wenn man noch eine Pufferzeit dazurechnet und grob aufrundet, wird ein AV in 45 min aufgeladen. Daraus folgt, dass eine Schnellladestation über 24h verteilt insgesamt $FS = 32$ Fahrzeuge abfertigen kann.

Szenario Tankstelle:

Um zu wissen, wie viele Ladestationen es im Szenario benötigt, muss herausgefunden werden, wie hoch die Fahrdistanzen pro Fahrzeug sind. Dabei wurden die Zahlen aus Abbildung 5 verwendet plus einen Aufschlag von je 1 km für Leerfahrt hin zur Ladestation und zurück. Daraus folgt, dass ein AV im 1. Fall 1.38 Mal pro Tag aufgeladen werden muss im 2. Fall 1.83 pro Tag (Anhang 2). Aus Formel 6 folgt danach $TLV = 5'520$ Aufladungen pro Tag, respektive im 2. Fall 7'320 Aufladungen. Mit Formel 7 findet man die Anzahl Ladestationen heraus, welche im 1. Fall 173 und im 2. Fall 229 beträgt.

Die Kosten einer Ladestation (=KLA) betragen über 10 Jahre für den 1. Fall 37'005 CHF und für den 2. Fall 35'898 CHF. Dabei werden die Hardware-, Netzanschluss-, Genehmigungs- und Baukosten über 10 Jahre abgeschrieben und die Wartungskosten treten jährlich auf. Detailliertere Rechnungen dazu sind im Anhang 3 zu finden. Mittels Formel 8 entstehen im 1. Fall 1'754 CHF / d und im 2. Fall 2'252 CHF / d totale Kosten aller Ladestationen pro Tag.

Der Strompreis für die Stadt Zürich beträgt gemäss Abbildung 3 17 Rp. / kWh. Mit Formel 9 werden im 1. Fall 33'501 CHF / d und im 2. Fall 44'425 CHF / d Stromkosten pro Tag entstehen. Anhand Formel 10 wird die effektive Fahrdistanz berechnet. Diese entsteht dadurch, dass ein AV zusätzliche Leerkilometer produziert, wenn das Fahrzeug zur Ladestation fährt. Die TFD kann aus Abbildung 4 entnommen werden. Damit folgt im 1. Fall eine EFD von 1'429'330 km

und im 2. Fall 1'432'930 km. Schlussendlich kann mit Formel 11 die Kosten für die Ladeinfrastruktur berechnet werden. Diese beträgt im 1. Fall 2.47 Rp. / km und im 2. Fall 3.26 Rp / km.

Szenario Tankstelle:

Tabelle 5 Ergebnis Szenario Tankstelle 2018

Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel/Daten
Zusätzliche Leerkilometer [km]	2	2	Kapitel 4.1
Anzahl Ladevorgänge pro Fahrzeug und Tag	1.38	1.83	Anhang 2
Totale Anzahl Ladevorgänge pro Tag	5'520	7'320	(6)
Anzahl Ladestationen	173	229	(7)
Kosten pro Ladestation [CHF]	37'005	35'898	Anhang 3
Totale Kosten aller Ladestationen pro Tag [CHF/d]	1'754	2'252	(8)
Stromkosten [CHF]	33'501	44'425	(9)
Strompreis [CHF/kWh]	0.17	0.17	Abbildung 3
Gesamtkosten [CHF/d]	35'255	46'677	
Effektive totale Fahrdistanz [km]	1'429'330	1'432'930	(10)
Kosten Ladeinfrastruktur [Rp./km]	2.47	3.26	(11)

Szenario Parkhaus:

Tabelle 6 Ergebnis Szenario Parkhaus 2018

Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel/Daten
Zusätzliche Leerkilometer [km]	8	8	Kapitel 4.1
Anzahl Ladevorgänge pro Fahrzeug und Tag	1.40	1.86	Anhang 2
Totale Anzahl Ladevorgänge pro Tag	5'600	7'440	(6)
Anzahl Ladestationen	175	233	(7)
Kosten pro Ladestation [CHF]	37'005	35'898	Anhang 3
Totale Kosten aller Ladestationen pro Tag [CHF/d]	1'774	2'292	(8)
Stromkosten [CHF]	33'986	45'153	(9)
Strompreis [CHF/kWh]	0.17	0.17	Abbildung 3
Gesamtkosten [CHF/d]	35'760	47'445	
Effektive totale Fahrdistanz [km]	1'463'090	1'477'810	(10)
Kosten Ladeinfrastruktur [Rp./km]	2.44	3.21	(11)

Szenario Dübendorf:

Tabelle 7 Ergebnis Szenario Dübendorf 2018

Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel/Daten
Zusätzliche Leerkilometer [km]	24	24	Kapitel 4.1
Anzahl Ladevorgänge pro Fahrzeug und Tag	1.46	1.94	Anhang 2
Totale Anzahl Ladevorgänge pro Tag	5'840	7'760	(6)
Anzahl Ladestationen	183	243	(7)
Kosten pro Ladestation [CHF]	37'005	35'898	Anhang 3
Totale Kosten aller Ladestationen pro Tag [CHF/d]	1'855	2'390	(8)
Stromkosten [CHF]	22'934	30'474	(9)
Strompreis [CHF/kWh]	0.11	0.11	Abbildung 3
Gesamtkosten [CHF/d]	24'789	32'864	
Effektive totale Fahrdistanz [km]	1'558'450	1'604'530	(10)
Kosten Ladeinfrastruktur [Rp./km]	1.59	2.05	(11)

4.4 Fallbeispiel 2030

Weil davon auszugehen ist, dass die Entwicklung von Fahrzeugen und Ladestationen fortschreitet, werden im Jahr 2030 andere Kennwerte für Fahrzeuge und Ladestationen als im Jahr 2018 vorherrschen. In Tabelle 8 sind die für im Fallbeispiel 2030 verwendeten Annahmen und deren Einfluss auf die anderen Variablen aufgelistet. Ein grosser Unterschied gibt es in der vorliegenden Ladetechnik. Anstatt das Fahrzeug an einer Ladesäule aufzuladen, kann das AV wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben mit der induktiven Ladetechnik völlig autonom aufgeladen werden. Zusätzlich ist die Ladeleistung doppelt so hoch wie im Jahr 2018, nämlich 100 kW. Die daraus folgende exakte Ladezeit beträgt 33.6 min. Addiert man eine Pufferzeit dazu und rundet auf, wird ein Selbstfahrendes Taxi in 36 min aufgeladen und daraus folgt FS = 40. Der verwendete Strompreis wird wegen der ungewissen Zukunft wie im Jahre 2018 angenommen. Für den Einfluss der Aussentemperatur wurde auch hier für den 1. Fall 22 °C und für den 2. Fall -10 °C.

Tabelle 8 Kennwerte von Fahrzeugen und Ladestationen im Jahr 2030

Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel/Daten
Theoretische Reichweite [km]	695	695	
Theoretische Speicherkapazität Batterie [kWh]	80	80	
Aufgenommene "Strommenge" [kWh]	56	56	(3)
Effektive Reichweite [km]	487	423	(4)
Ladezeit [min]	36	36	(5)
Kapazität Ladestation pro Tag [Fahrzeuge/d]	40	40	

Szenario Tankstelle:

Tabelle 9 Ergebnis Szenario Tankstelle 2030

Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel/Daten
Zusätzliche Leerkilometer [km]	2	2	Kapitel 4.1
Anzahl Ladevorgänge pro Fahrzeug und Tag	0.74	0.86	Anhang 2
Totale Anzahl Ladevorgänge pro Tag	2'960	3'440	(6)
Anzahl Ladestationen	74	86	(7)
Kosten pro Ladestation [CHF]	49'500	49'500	Anhang 3
Totale Kosten aller Ladestationen pro Tag [CHF/d]	1'004	1'166	(8)
Stromkosten [CHF]	28'179	32'749	(9)
Strompreis [CHF/kWh]	0.17	0.17	Abbildung 3
Gesamtkosten [CHF/d]	29'183	33'915	
Effektive totale Fahrdistanz [km]	1'424'210	1'425'170	(10)
Kosten Ladeinfrastruktur [Rp./km]	2.05	2.42	(11)

Szenario Parkhaus:

Tabelle 10 Ergebnis Szenario Parkhaus 2030

Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel/Daten
Zusätzliche Leerkilometer [km]	8	8	Kapitel 4.1
Anzahl Ladevorgänge pro Fahrzeug und Tag	0.76	0.87	Anhang 2
Totale Anzahl Ladevorgänge pro Tag	3'040	3'480	(6)
Anzahl Ladestationen	76	87	(7)
Kosten pro Ladestation [CHF]	49'500	49'500	Anhang 3
Totale Kosten aller Ladestationen pro Tag [CHF/d]	1'031	1'180	(8)
Stromkosten [CHF]	28'941	33'130	(9)
Strompreis [CHF/kWh]	0.17	0.17	Abbildung 3
Gesamtkosten [CHF/d]	29'972	34'310	
Effektive totale Fahrdistanz [km]	1'442'610	1'516'245	(10)
Kosten Ladeinfrastruktur [Rp./km]	2.08	2.3	(11)

Szenario Dübendorf:

Tabelle 11 Ergebnis Szenario Dübendorf 2030

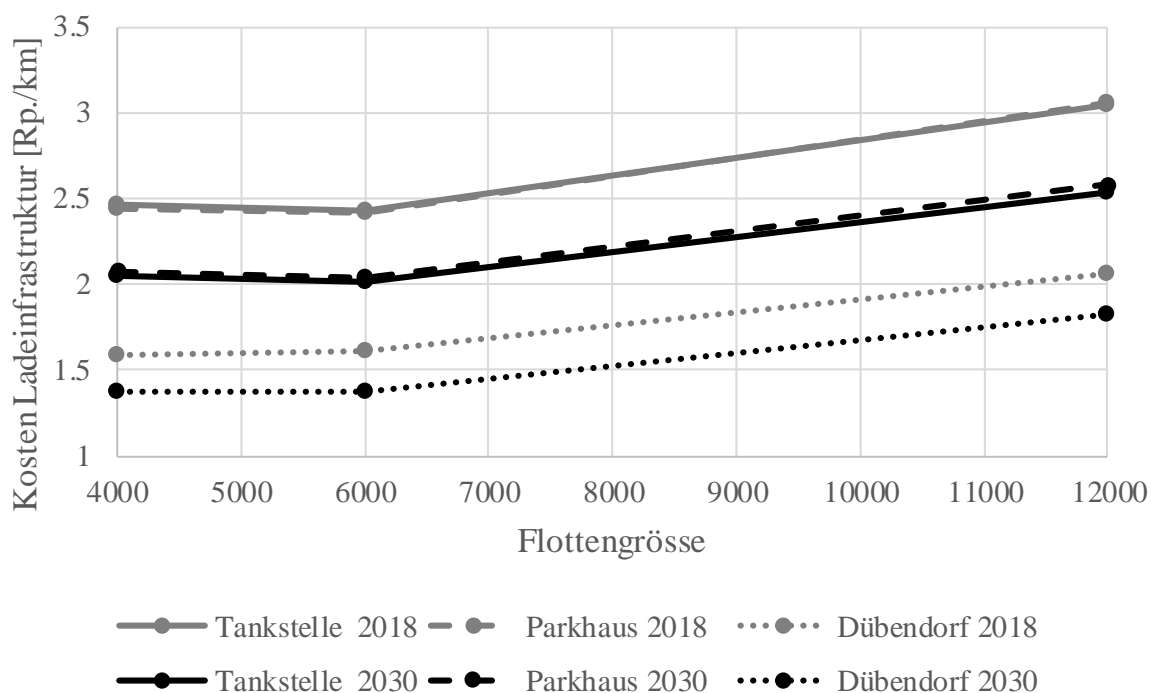
Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel/Daten
Zusätzliche Leerkilometer [km]	24	24	Kapitel 4.1
Anzahl Ladevorgänge pro Fahrzeug und Tag	0.79	0.91	Anhang 2
Totale Anzahl Ladevorgänge pro Tag	3'160	3'640	(6)
Anzahl Ladestationen	79	91	(7)
Kosten pro Ladestation [CHF]	49'500	49'500	Anhang 3
Totale Kosten aller Ladestationen pro Tag [CHF/d]	1'071	1'234	(8)
Stromkosten [CHF]	19'466	22'422	(9)
Strompreis [CHF/kWh]	0.11	0.11	Abbildung 3
Gesamtkosten [CHF/d]	20'537	23'656	
Effektive totale Fahrdistanz [km]	1'494'130	1'505'650	(10)
Kosten Ladeinfrastruktur [Rp./km]	1.37	1.57	(11)

4.5 Vergleich Fallbeispiel 2018 und 2030

Die in Kapitel 4.3 und 4.4 erhaltenen Ergebnisse zu den Kosten der Ladeinfrastruktur beziehen sich immer auf die Flottengrösse von 4'000 Fahrzeugen. Um einen Vergleich mit anderen Flottengrössen zu tätigen sind die aufwendigen Berechnungen auch für die Flottengrössen von 6'000 und 12'000 Fahrzeugen gemacht worden und dem Anhang beigefügt.

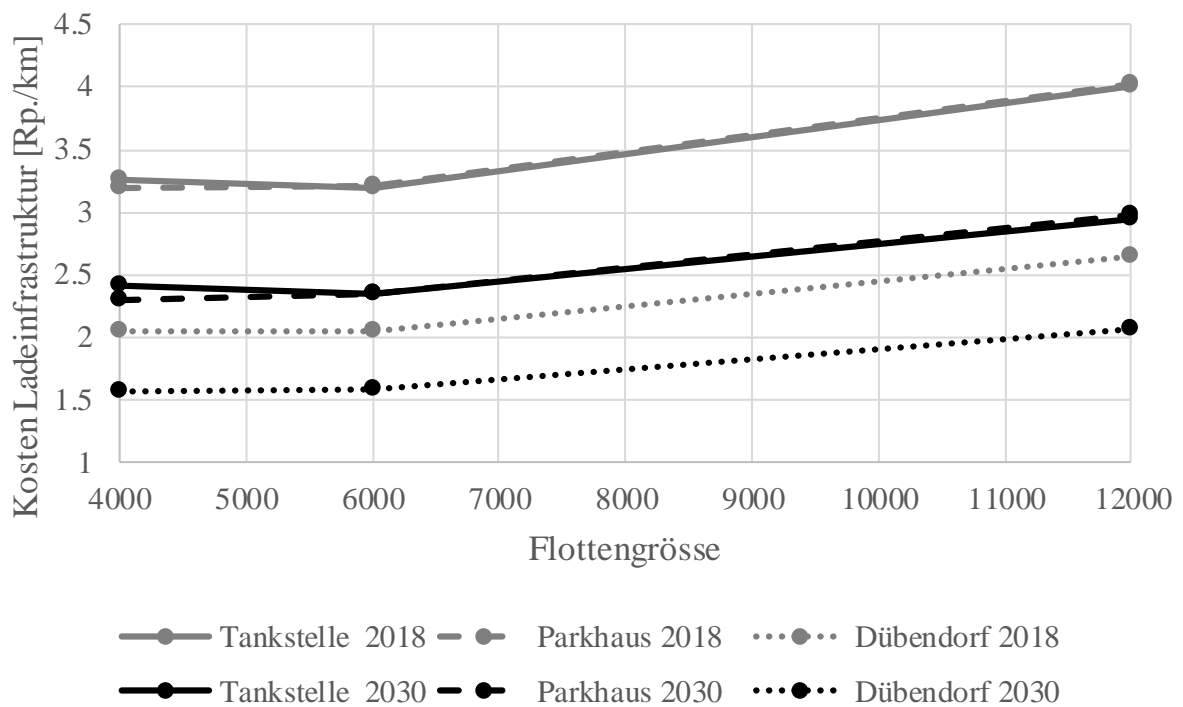
In Abbildung 9 sind die Resultate für den 1. Fall zusammengefasst. Dabei sind die Kosten beim Fallbeispiel 2018 für das Szenario Tankstelle und Szenario Parkhaus ähnlich. Zudem ist das Resultat für das zweite Fallbeispiel auch annähernd gleich. Die Kosten für das Szenario Innovationspark Dübendorf variieren in den verschiedenen Fallbeispielen, die Differenz beträgt aber im 1. Fall maximal 0.24 Rp. / km. Das Minimum der Kosten taucht im Szenario Innovationspark Dübendorf beim Fallbeispiel 2030 auf mit 1.37 Rp. / km. Im Gegensatz dazu ist das Maximum 3.06 Rp. / km beim Szenario Parkhaus im Fallbeispiel 2018.

Abbildung 9 Aussentemperatur 22 °C



In Abbildung 10 sind die erhaltenen Resultate für den 2. Fall dargestellt. Wieder sind die Kosten für die Szenarien Tankstelle und Parkhaus für das jeweilige Fallbeispiel ähnlich, ausser für die Flottengrösse von 4'000 Fahrzeugen. Im Fallbeispiel 2018 sind die Kosten für das Szenario Tankstelle 3.26 Rp. / km und für das Szenario Parkhaus 3.21 Rp. / km. Im Fallbeispiel 2030 entstehen für das Szenario Tankstelle Kosten in Höhe von 2.42 Rp. / km und für das Szenario Parkhaus 2.30 Rp. / km. Für das Szenario Innovationspark Dübendorf liegt der grösste Kostenunterschied zwischen den Fallbeispielen bei einer Flottengrösse von 12'000 und beträgt 0.58 Rp. / km.

Abbildung 10 Aussentemperatur -10 °C



Die minimale Anzahl von Ladestationen beträgt 74 Ladestationen und tritt im Fallbeispiel 2030 beim Szenario Tankstelle mit einer Flottengrösse von 4'000 Fahrzeugen auf. Die maximale Anzahl folgt aus dem Fallbeispiel 2018 beim Szenario Innovationspark Dübendorf mit einer Flottengrösse von 12'000 und liegt bei 319 Ladestationen. Somit benötigt man beim Landerwerb eine Grundfläche von 856.75 m², resp. 3668.5 m². Die Unterschiede für die verschiedenen Fälle werden in Kapitel 5 diskutiert.

5 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Annahmen der Berechnungen und die Resultate der quantitativen Analyse diskutiert, sowie weitere Ideen und Verbesserungen aufgezeigt.

Damit die Zwischenschritte der Berechnungen übersichtlich und interpretierbar bleiben, sind viele Werte einheitlich und nach mathematischen Regeln gerundet worden, was beim Detaillierungsgrad der Arbeit in Ordnung ist. Damit der Rechnungsweg trotzdem verständlich bleibt, wird grossen Wert auf eine gründliche Dokumentation gelegt.

Die Berechnungen in Kapitel 4 beruhen auf vielen Annahmen, Spekulationen und Idealfällen, die auf Basis gesammelter Kennzahlen entstehen. Jedoch sind konkrete Kennzahlen in der Literatur, vor allem zu Kosten einzelner Ladestationen nicht oder nur in seltenen Mengen erhältlich. Deshalb werden für die Berechnungen der Kosten pro Ladestation, unabhängig vom Ladestationstyp, die gleichen Ansätze für die Netzanschluss-, Genehmigungs-, Bau- und Wartungskosten angenommen. Weil in der Industrie der Massenrabatt bei Grossbestellungen einen Vertragsbestandteil darstellt und dieser nicht veröffentlicht wird, wird in der Arbeit ein plausibler Rabatt angenommen, der auch nur für die Ladehardware gilt. Da die Nachfrage die Forschung vorantreibt, werden die Preise für die Ladestation tendenziell sinken.

Für eine bessere Annahme der zusätzlichen Leerkilometer pro Szenario müsste eine detailliertere Analyse mit Simulationen durchgeführt werden und nicht von Hand pauschal eine Zahl definiert werden. Weitere Idealfälle werden bei der Auswahl, wann und welches Selbstfahrende Taxi aufgeladen wird, angenommen. Das AV berechnet z.B. wann es mit 10 % Restladezustand bei der Ladestation ankommt und lädt mit der Schnellladestation auf bis es ein Ladezustand von 80 % erreicht und die Ladestation schliesslich verlässt. Für einen höheren Ladezustand müsste die Ladeleistung gedrosselt werden, was deshalb nicht weiter betrachtet wird. Zusätzlich wird angenommen, dass immer die Ladestation angefahren werden kann, die am nächsten liegt und dass die Ladestation mit einer kurzen Pufferzeit innerhalb von 24 Stunden permanent am AVs aufladen ist.

Die technischen Spezifikationen von den AVs werden für das Fallbeispiel 2018 mit den aktuellen Fahrzeugwerten aus Tabelle 1 berechnet. Dabei wird der Mittelwert von den EVs Tesla, Nissan Leaf und BMW i3 gebildet und für die quantitative Analyse verwendet. Für das Fallbeispiel 2030 wird eine Interpolation anhand von den Prognosen für die Jahre 2020 und 2035 aus Tabelle 1 gemacht.

Aufgrund eines zu hohen Detaillierungsgrads werden folgende Einzelheiten in der quantitativen Analyse nicht näher betrachtet: Der Einfluss von der Fahrgeschwindigkeit, sowie der benötigten Energie um das Fahrzeug im Winter zu heizen und im Sommer zu kühlen, auf die Reichweite der AVs.

Anhand der Resultate in Kapitel 4.5 für die minimale und maximale Anzahl von Ladestationen darf man schliessen, dass je mehr zusätzliche Leerkilometer das jeweilige Szenario verursacht, umso mehr Ladestationen gebaut werden müssen.

Die Kosten für die Ladeinfrastruktur variieren je nach Annahme zur Aussentemperatur, Szenario und Fallbeispiel zwischen 1.37 Rp. / km und 4.02 Rp. / km Fahrdistanz. Dies hört sich zunächst nach wenig an. Aber wenn man beachtet, dass die ganze Fahrzeugflotte ungefähr 1.4 Mio. Kilometer pro Tag unterwegs ist, machen eine Differenz der Kosten von 0.01 Rp. / km einen Unterschied von 14'000 CHF pro Tag aus. Die hohen Fahrdistanzen entstehen durch die Simulationsergebnisse aus Kapitel 2.5, da dort alle Reisen innerhalb des Stadtgebietes mit AVs absolviert werden. Die Kosten der Ladeinfrastruktur werden bewusst durch die totale Fahrdistanz geteilt und nicht nur durch die Kundendistanz oder die Anzahl Leerkilometer, weil der Passagier im Idealfall die ganzen Kosten trägt.

In Abbildung 9 & 10 ist auch klar ersichtlich, dass das Szenario Innovationspark Dübendorf, obschon pro Fahrt zur Ladestation und zurück 24 Leerkilometer hinzugefügt werden, die tiefste Ladeinfrastrukturkosten aufweist. Dies ist dadurch erklärbar, dass die angenommenen Stromkosten in Dübendorf 6 Rp. / kWh günstiger als in der Stadt Zürich sind. In Kombination mit dem jährlichen Stromengenverbrauch von 60-100 GWh resultiert daraus der grosse Preisunterschied. Damit kann gesagt werden, dass für die Kosten der Ladeinfrastruktur der Strompreis die massgebende Grösse ist und nicht die Kosten pro Ladestation. Dies spiegelt auch Tabelle 9 wider, wo die totalen Kosten der Ladestation 1'004 CHF / d und die Stromkosten 28'179 CHF / d beziffert werden. Jedoch muss abgeklärt werden, ob durch den hohen Verbrauch das lokale Stromnetz ausgebaut werden muss.

Die Kilometerkosten für die Flottengrösse 4'000 und 6'000 sind gemäss Abbildung 9 & 10 für das jeweilige Szenario beinahe konstant, trotz der zusätzlichen Leerkilometer von 2, 8 und 24 Kilometer. Dies kommt dadurch zu Stande, dass in Formel 11 der Zähler in Form von Kosten zunimmt, sowie der Nenner in Form von Kilometer Fahrdistanz zunimmt. Anhand vom Fallbeispiel 2018 mit den Szenarien Tankstelle und Parkhaus wird dieser Umstand aufgezeigt. Der Nenner beträgt 33'255 CHF / d, resp. 35'760 CHF / d und der Zähler 1'429'330 km / d, resp. 1'463'090 km / d. Daraus folgt 2.47 Rp. / km, resp. 2.44 Rp. / km.

Weil die Kosten für die Flottengrösse von 12'000 Fahrzeugen wachsen, aber die Nachfrage für mehr Fahrten mit Selbstfahrenden Taxis nicht steigt, nehmen die Kosten für die Ladeinfrastruktur zu.

Da in Abbildung 9 der Optimalfall bezüglich der Aussentemperatur gewählt wird, sind die Kosten für das jeweilige Szenario immer tiefer als in Abbildung 10, wo der Extremfall im Winter von -10 °C angenommen wird. Die Differenzen gehen von 0.2 Rp. / km für das Szenario Innovationspark Dübendorf im Fallbeispiel 2018 und einer Flottengrösse von 4'000 Fahrzeugen bis zu 0.96 Rp. / km für das Szenario Tankstelle im Fallbeispiel 2018 mit einer Flottengrösse von 12'000 Fahrzeugen.

Egal, ob man Abbildung 9 oder Abbildung 10 betrachtet, die Kosten der Ladeinfrastruktur sind für das jeweilige Szenario im Fallbeispiel 2030 tiefer als im Fallbeispiel 2018. Der Hauptgrund dafür liegt in der höheren Speicherkapazität der Fahrzeugbatterie und der doppelt so hohen Ladeleistung der Ladestation. Daraus folgt auch, dass die totale Anzahl von Ladevorgängen pro Tag reduziert werden und weniger Ladestationen gebaut werden müssen. Die Ladezeit verringert sich vom Fallbeispiel 2018 zum Fallbeispiel 2030 um 8 min. Ausserdem besitzt das Fahrzeug eine grössere Reichweite.

Eine ganz andere Möglichkeit eine Ladeinfrastruktur aufzubauen wäre, anstatt Schnellladestationen langsamere Ladeeinheiten mit kleineren Ladeleistungen zu installieren, welche tiefere Anschaffungskosten verursachen. Da aber die Kosten der Ladestationen nicht so einen grossen Einfluss auf die Endkosten der Ladeinfrastruktur besitzt, wird dieser Fall eher nicht eintreffen. Eine Möglichkeit die AVs ausserhalb des Stadtgebietes nur während der Nacht aufzuladen um vom Niedertarif zu profitieren wäre eine Option, aber das Ladezeitfenster von nur 8 Stunden ist sehr knapp bemessen. Jedoch kann dieses Ladekonzept mit punktuellen Notladestationen innerhalb des Stadtgebietes entgegengewirkt werden. Dazu müsste für das Verhältnis von Nachtladestation und Notladestation ein Optimum gefunden werden.

6 Schlusswort und Ausblick

Trotz vielen Annahmen, sind die wichtigsten Abhängigkeiten und deren Einfluss für die Berechnung von den Ladeinfrastrukturkosten ermittelt. Zu den Abhängigkeiten zählen die Flottengrösse, die technischen Spezifikationen der Fahrzeuge, die Aussentemperatur, das gewählte Ladeszenario und der dazugehörige Strompreis. Wenn man aber die Kosten der Ladeinfrastruktur mit dem Kilometerpreis eines AV vergleicht, sind die Kosten nur ein Tropfen auf den heissen Stein. Der Ansatz für das beste Szenario in der Stadt Zürich wird vermutlich eine Mischung aus den vorgestellten Szenarien sein.

Weiterführende Arbeiten können die zusammengestellten Koordinaten und Kosten für Simulationen in MATSim verwenden. Zusätzlich können die Formeln der quantitativen Analyse als Grundlage für detailliertere Kostenabschätzungen dienen. Interessant wäre, wenn die Simulationen von Hörl et al. (2018a) mit weniger Fahrzeugen durchgeführt werden, weil die kleinste Flottengrösse mit 4'000 Fahrzeugen in der Stadt Zürich rund ein Drittel grösser ist als die 2'930 Fahrzeuge (Mobility, 2018), die der grösste Carsharing Anbieter in der ganzen Schweiz besitzt. Zudem könnte man auch Fahrten zum Flughafen Zürich und zurück als Angebot simulieren.

Ob Selbstfahrende Taxis in Zukunft wirklich so einen grossen Einfluss auf unser Reiseverhalten haben werden, wie angenommen, wird sich mit der Zeit zeigen. Besonders spannend ist, in welchem Zeitraum das geschehen wird, in welcher Form und wie die Ladeinfrastruktur aussehen wird.

7 Literatur

- ABB (2018) Multistandard-Schnellladestationen, <https://new.abb.com/ev-charging/de/pr-odukte/ladestationen-pkws/multistandard-schnellladestationen>, ABB Schweiz AG, Zürich, Oktober 2018.
- AGVS (2014), Anschluss finden Elektromobilität und Infrastruktur, Broschüre von Electro-suisse, e'mobile und VSE, August 2014.
- ASTRA (2018a) Elektromobilität, <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/elektromobilitaet.html>, Bundesamt für Strassen, Bern, Oktober 2018.
- ASTRA (2018b) Stufen der Automatisierung, <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/intelligente-mobilitaet/stufen-der-automatisierung.html>, Bundesamt für Strassen, Bern, November 2018.
- Awad, E., S. Dsouza, R. Kim, J. Schulz, J. Henrich, A. Shariff, J.-F. Bonnefon und I. Rahwan (2018) The Moral Machine experiment, *Nature* **563**, 59-64.
- Batterie Zukunft (2018) Schnelles Laden ermüdet die Batterie vorzeitig, <http://www.batterie-zukunft.de/nutzen/schnellladen>, Kiefermedia GmbH, Offenburg, November 2018.
- Belser Campero, G. (2017) Fleet sizing of shared, self-driving cars with electric propulsion considering the outside temperature, *Bachelor-Thesis in Civil Engineering*, Institute for Transport and Planning Systems (IVT), Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich.
- Bianchetti, R. (2018) Entwicklungen und Trends in der Elektromobilität, Seminar Elektromobilität, EBP AG, Zürich, Juni 2018.
- Bierstedt, J., A. Gooze, C. Gray, J. Peterman, L. Raykin und J. Walters (2014) Effects of next-generation vehicles on travel demand and highway capacity, *White Paper*.
- Bösch, P. F. Becker, H. Becker und K.W. Axhausen (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, *Transport Policy*, **64**, 76-91.

BP (2017) Oil reserves, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/oil/oil-reserves.html>, British Petroleum, London, Oktober 2018.

BR (2016) Autonomes Fahren: Wenn Hacker Autos manipulieren, <https://www.br.de/mediathek/video/autonomes-fahren-wenn-hacker-autos-manipulieren-av:584f800b3b46790011988da9>, BR Mediathek, München, November 2018.

Bressan, L. und M. Ganzmann (2018) Project ABMT 2017: Electric Autonomous Vehicles, Institute for Transport and Planning Systems (IVT), ETH Zürich, Zürich.

Buttelmann M., M. Kieren, B. Lohmann (2000) Trajektoriengenerierung und Bahnregelung für nichtholonome, autonome Fahrzeuge, In: Schmidt G., Hanebeck U., Freyberger F. (eds) Autonome Mobile Systeme 1999. Informatik aktuell. Springer, Berlin, Heidelberg.

cash (2017) Huhn oder Ei? Für E-Autos fehlen Zehntausende Ladesäulen, <https://www.cash.ch/news/top-news/elektroauto-huhn-oder-ei-fuer-e-autos-fehlen-zehntausende-ladesaeulen-1098499>, Bank zweiplus AG, Zürich, November 2018.

Chen, T. D. (2015) Management of a Shared, Autonomous, Electric Vehicle Fleet: Vehicle Choice, Charging Infrastructure & Pricing Strategies, *Dissertation*, University of Texas at Austin.

de Haan, P. und R. Zah (2013) Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz, vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich, Zürich.

Easelink (2018) Matrix Charging[®], https://easelink.com/#technical-features__anchor, Easelink GmbH. Graz, November 2018.

EBP, P. de Haan, R. Bianchetti, S. Rosser, A. Märki und I. Erny (2018) Szenarien der Elektromobilität in der Schweiz – Update 2018, EBP Schweiz AG, Zürich.

EICom (2018), Die kantonalen Strompreise im Vergleich, <https://www.strompreis.elcom.admin.ch/Map/ShowSwissMap.aspx>, Eidgenössische Elektrizitätskommission, Bern, Dezember 2018.

- Electrosuisse (2018) Marktanteil Elektroautos in der Schweiz 2018, <http://blog.electrosuisse.ch/marktanteil-elektroautos-in-der-schweiz-2018>, Electrosuisse, Fehraltorf, November 2018.
- Emil (2018) Elektrobusse mit induktiver Ladetechnik – der Schritt in ein neues Zeitalter des ÖPNV, <https://www.verkehr-bs.de/unternehmen/elektrobusse-emil/>, Braunschweiger Verkehrs-GmbH, Braunschweig, November 2018.
- eMove360° (2018a) Ultraschnelles Laden von Elektrofahrzeugen. Illusion oder Realität, 03-2018, **26-29**, e-Monday UG, München.
- eMove360° (2018b) Autonom fahrende Lkw für Logistikzentren, 03-2018, **36-37**, e-Monday UG, München.
- Engel, A. (2018) Wie sicher ist die Zukunft?, Magazin Messe Auto Zürich 2018, 4-9 Ringier AG Zofingen.
- ewz (2018) Stromtarif 2018 – Stadt Zürich, <https://www.ewz.ch/content/dam/ewz/services/dokumentencenter/energie-beziehen/dokumente/gruener-strom-fuer-mein-unternehmen/stromtarif-2018-zh-geschaeftskunden.pdf>., Elektrizitätswerke der Stadt Zürich, Zürich, Dezember 2018.
- Feusi, A. (2018) Es geht voran mit Zürichs E-Mobilität, 09.06.2018, <https://www.nzz.ch/zuerich/die-stadt-zuerich-erhaelt-30-ladestationen-fuer-e-fahrzeuge-ld.1393179>, Neue Zürcher Zeitung, Zürich, November 2018.
- Frazzoli, E., C. Ruch und L. Sieber (2018) Die Zukunft der Mobilität – eine Chance für den öffentlichen Verkehr, ÖV-Branchenkonferenz 2018, FHNW, Olten.
- Frick, M., G. Carle, A. Wokaun und K.W. Axhausen (2007) Optimization of the distribution of compressed natural gas (CNG) refueling stations: Swiss case studies, *Transportation Research D*, **12** (1) 10-22.
- Fritzsche, D. (2018) Das Rennen um die Elektromobilität läuft ohne Zürich, <https://www.nzz.ch/meinung/das-rennen-um-die-elektromobilitaet-laeuft-ohne-zuerich-ld.1391964?reduced=true>, Neue Zürcher Zeitung, Zürich, 06.06.2018.

- Fuchs, A. und T. Hügli (2014) Ladestationen für Elektromobilität, E-Mob EV – CH, Ausgabe 2014, Version 1.0, Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE, Aarau.
- Galus, M. D., G. Georges, R und A. Waraich (2013) Abschlussbericht des Projekts ARTEMIS, Arbeitsgruppe ETH Zürich, Zürich.
- Hörl, S., C. Ruch, F. Becker, E. Frazzoli und K.W. Axhausen (2018a) Fleet operational policies for automated mobility: A simulation assessment for Zurich, IVT, ETH Zürich, Zürich.
- Hörl, S., F. Becker, T. Dubernet und K.W. Axhausen (2018b) Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung, IVT, ETH Zürich, Zürich.
- Hörl, S., A. Erath und K.W. Axhausen (2016) Simulation of autonomous taxis in a multi-modal traffic scenario with dynamic demand, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **1184**.
- Ionity (2018) Design & Technik, <https://ionity.eu/de/design-und-technik.html>, Ionity GmbH, München, November 2018.
- Lam, A.Y.S, Y.-W. Leung, X. Chu (2014) Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solution, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2846-2856, November 2014, Argonne National Laboratory, Chicago.
- Leiva, L. (2017) Wie stark belastet die Batterieherstellung die Ökobilanz von Elektroautos?, <https://www.energie-experten.ch/de/mobilitaet/detail/wie-stark-belastet-die-batterieherstellung-die-oekobilanz-von-elektroautos.html>, Oktober 2018.
- Litman, T. (2014) Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications für Transport Planning, Aufsatz präsentiert am 93. *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington D.C., Januar 2014.
- Maunsell, D., P. Tanguturi und J. Hogarth (2014) Realising the benefits of autonomous vehicles in Australia, *Accenture*.

Merten, C. (2018) Autonome Autos: Hier fahren sie bereits durch Deutschland, 27.09.2018, <https://aiomag.de/test-auf-der-a9-die-modernste-strasse-der-welt-383>, aio Audi AG, Ingolstadt, November 2018.

Mobility (2018) Von klein bis gross: 2'930 Autos und 200 Scooter in 10 Kategorien., <https://www.mobility.ch/de/fahrzeuge-standorte/fahrzeuge/>, Mobility Genossenschaft, Rotkreuz, Dezember 2018.

Mobilityhouse (2018) Kauf einer Ladestation für mein Elektroauto, https://www.mobilityhouse.com/de_de/ratgeber/was-muss-ich-beim-kauf-einer-ladestation-fuer-mein-elektroauto-beachten, The Mobility House GmbH, München, November 2018.

NHTSA (2013) Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles, Bericht, National Highway Traffic Safety Administration, Washington D.C..

NPE (2015) Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland, Nationale Plattform Elektromobilität, Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Berlin, November 2015.

NZZ (2018) Tödlicher Unfall in Arizona: Selbstfahrendes Uber-Auto fährt Frau an, 19.03.2018, <https://www.nzz.ch/panorama/selbstfahrendes-uber-auto-faehrt-frau-an-tot-ld.1367523>, Neue Zürcher Zeitung, Zürich, Oktober 2018.

NZZ (2016) Postauto unterbricht Test nach Unfall, 22.09.2016, <https://www.nzz.ch/schweiz/selbstfahrender-minibus-postauto-unterbricht-test-nach-unfall-ld.118212>, Neue Zürcher Zeitung, Zürich, Oktober 2018.

Reber, V. (2018) Die Zukunft des Schnellladens: Die 800-Volt-Technologie, eMobilJournal, 36-39, 04/18, ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg.

SAE International (2016) Levels of driving automation are defined in new SAE international standard J3016, https://www.smmmt.co.uk/wp-content/.../automated_driving.pdf, November 2018.

Schrader, C. (2017) Ein kritischer Blick, <https://www.spektrum.de/news/wie-ist-die-umwelt-bilanz-von-elektroautos/1514423>, Spektrum.de, Heidelberg, Oktober 2018.

Sedlak, M. (2018) Kosten von Lademöglichkeiten für Elektroautos, <https://sedl.at/Elektroauto/Lademoeglichkeiten/Kosten>, November 2018.

Siemens (2018) Ladetechnik für eBusse, <https://w1.siemens.ch/mobility/ch/de/topics/elektromobilitaet/Seiten/ladetechnik-ebusse.aspx>, Siemens Mobility AG, Wallisellen, Oktober 2018.

SRF (2016) Wie breit muss ein Parkplatz sein?, <https://www.srf.ch/sendungen/kassensturz-espresso/wie-breit-muss-ein-parkplatz-sein>, Schweizer Radio und Fernsehen, Zürich, Dezember 2018.

Switzerland Innovation (2018) Innovationspark Zürich, <https://www.switzerland-innovation.com/zurich/de/portrait>, Stiftung Innovationspark Zürich, Dübendorf, Dezember 2018.

Plugless (2018) Plugless Q&A, <https://www.pluglesspower.com/plugless-questions/>, Evatran, Richmond, Virginia, November 2018.

Porsche Engineering (2018) Elektromobilität als Chance, Interview von Hans Schilder mit Michael Kiefer und Otmar Bitsche, Porsche Engineering Magazin 1/2018, **52-57**, Porsche Engineering Group GmbH, Weissach.

Postauto (2018) Projekt <<SmartShuttle>>, <https://www.postauto.ch/de/projekt-%C2%ABsmartshuttle%C2%BB>, Postauto AG, Bern, Oktober 2018.

vbzonline (2018a) Mit <<Self-E>> die Mobilität der Zukunft erfahren, <https://vbzonline.ch/2018/02/07/self-e/>, Verkehrsbetriebe Zürich, Zürich, Oktober 2018.

vbzonline (2018b) Wie weiss der autonome Bus, dass die Ampel rot ist?, <https://vbzonline.ch/2018/08/20/wie-weiss-der-autonome-bus-dass-die-ampel-rot-ist/>, Verkehrsbetriebe Zürich, Zürich, November 2018.

Wang, H., Q. Huang, C. Zhang, A. Xia (2010) A novel approach for the layout of electric vehicle charging station, The 2010 International Conference on Apperceiving Computing Intelligence Analysis Proceeding.

Wambsganss, P. (2018) Kontaktloses Laden mit Magnetic-Resonance-Technologie, eMobilJournal, 22-25, 04/18, ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg.

Wu, H. H., A. Gilchrist, K. Sealy, P. Israelsen und J. Muhs (2011) A review on inductive charging for electric vehicles, IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Niagara Falls, Kanada, Mai 2011.

Zeyen, M. (2018) High Power Charging: Schnell, schneller, am schnellsten?, eMobilJournal, 30-35, 04/18, ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg.

Zürich (2018), Parkplätze & Parkhäuser, https://www.stadt-zuerich.ch/fd/de/index/liegenschaftenverwaltung/parkplaetze_u_parkhaeuser.html, Stadt Zürich Finanzdepartement, Zürich, Dezember 2018.

8 Anhang

8.1 Kontaktdaten

<p>Jovica Trakilovic Anlagenmanager Parking Zürich AG Widdergasse 1 8001 Zürich +41 44 229 50 50 +41 79 703 33 96 jovica.trakilovic@parkingzuerichag.ch</p>	<p>Marcel Mayer Abteilungsleiter Technik Alpiq E-Mobility AG Brandschenkestrasse 150 8002 Zürich +41 58 833 82 85 +41 79 438 89 49 marcel.mayer@alpiq.com</p>
<p>Michael Auer Fachspezialist Engineering NDL EWZ Stadt Zürich Pfingstweidstrasse 85 8005 Zürich +41 58 319 41 10 +41 79 858 37 66 michael.auer@ewz.ch</p>	<p>Weitere Kontaktdaten von Personen, die nicht direkt in der Arbeit erwähnt werden, sind auf Anfrage erhältlich.</p>

8.2 Berechnung FLV

Abbildung 11 Berechnung FLV Fallbeispiel 2018

Fallbeispiel 2018				ZL		ZL		ZL	
FG 4000				2		8		24	
	Fahrdistanz	ER 1. Fall	ER 2. Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall
mean	355	262.5	198.5	1.36	1.7985	1.3829	1.8287	1.4438	1.9093
max	418	262.5	198.5	1.6	2.1159	1.6229	2.1461	1.6838	2.2267
min	308	262.5	198.5	1.181	1.5617	1.2038	1.5919	1.2648	1.6725
			FLV	1.38	1.83	1.4	1.86	1.46	1.94
Fallbeispiel 2018				ZL		ZL		ZL	
FG 6000				2		8		24	
	Fahrdistanz	ER 1. Fall	ER 2. Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall
mean	243	262.5	198.5	0.9333	1.2343	0.9562	1.2645	1.0171	1.3451
max	345	262.5	198.5	1.3219	1.7481	1.3448	1.7783	1.4057	1.8589
min	136	262.5	198.5	0.5257	0.6952	0.5486	0.7254	0.6095	0.806
			FLV	0.93	1.23	0.95	1.26	1.01	1.34
Fallbeispiel 2018				ZL		ZL		ZL	
FG 12000				2		8		24	
	Fahrdistanz	ER 1. Fall	ER 2. Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall
mean	116	262.5	198.5	0.4495	0.5945	0.4724	0.6247	0.5333	0.7053
max	317	262.5	198.5	1.2152	1.6071	1.2381	1.6373	1.299	1.7179
min	0	262.5	198.5	0.0076	0.0101	0.0305	0.0403	0.0914	0.1209
			FLV	0.56	0.74	0.58	0.77	0.64	0.85

Abbildung 12 Berechnung FLV Fallbeispiel 2030

Fallbeispiel 2030				ZL		ZL		ZL	
FG 4000				2		8		24	
	Fahrdistanz	ER 1. Fall	ER 2. Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall
mean	355	487	423	0.7331	0.844	0.7454	0.8582	0.7782	0.896
max	418	487	423	0.8624	0.9929	0.8747	1.0071	0.9076	1.0449
min	308	487	423	0.6366	0.7329	0.6489	0.747	0.6817	0.7849
			FLV	0.74	0.86	0.76	0.87	0.79	0.91
Fallbeispiel 2030				ZL		ZL		ZL	
FG 6000				2		8		24	
	Fahrdistanz	ER 1. Fall	ER 2. Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall
mean	243	487	423	0.5031	0.5792	0.5154	0.5934	0.5483	0.6312
max	345	487	423	0.7125	0.8203	0.7248	0.8345	0.7577	0.8723
min	136	487	423	0.2834	0.3262	0.2957	0.3404	0.3285	0.3783
			FLV	0.5	0.58	0.51	0.59	0.54	0.63
Fallbeispiel 2030				ZL		ZL		ZL	
FG 12000				2		8		24	
	Fahrdistanz	ER 1. Fall	ER 2. Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall	1.Fall	2.Fall
mean	116	487	423	0.2423	0.279	0.2546	0.2931	0.2875	0.331
max	317	487	423	0.655	0.7541	0.6674	0.7683	0.7002	0.8061
min	0	487	423	0.0041	0.0047	0.0164	0.0189	0.0493	0.0567
			FLV	0.3	0.35	0.31	0.36	0.35	0.4

8.3 Berechnung KLA

Abbildung 13 Berechnung KLA Fallbeispiel 2018

Fallbeispiel 2018		ab 100 Stück -->	Massenrabatt	0.3
		Kosten nach 10 Jahren		
Hardware	22150	22150	15505	
Netzanschlusskosten	5750	5750	5750	
Genehmigung	1725	1725	1725	
Bau	4025	4025	4025	
Wartung (jährlich)	1000	10000	10000	
		Total	37005 CHF	
Fallbeispiel 2018		ab 200 Stück -->	Massenrabatt	0.35
		Kosten nach 10 Jahren		
Hardware	22150	22150	14397.5	
Netzanschlusskosten	5750	5750	5750	
Genehmigung	1725	1725	1725	
Bau	4025	4025	4025	
Wartung (jährlich)	1000	10000	10000	
		Total	35898 CHF	

Abbildung 14 Berechnung KLA Fallbeispiel 2030

Fallbeispiel 2030		ab 50 Stück -->	Massenrabatt	0.2
		Kosten nach 10 Jahren		
Hardware	22150	35000	28000	
Netzanschlusskosten	5750	5750	5750	
Genehmigung	1725	1725	1725	
Bau	4025	4025	4025	
Wartung (jährlich)	1000	10000	10000	
		Total	49500 CHF	
Fallbeispiel 2030		ab 100 Stück -->	Massenrabatt	0.3
		Kosten nach 10 Jahren		
Hardware	22150	35000	24500	
Netzanschlusskosten	5750	5750	5750	
Genehmigung	1725	1725	1725	
Bau	4025	4025	4025	
Wartung (jährlich)	1000	10000	10000	
		Total	46000 CHF	

8.4 Weitere Kostenberechnungen

Flottengrösse 6'000 Fallbeispiel 2018:

Tabelle 12 Szenario Tankstelle				Tabelle 13 Szenario Parkhaus			
Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel	Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel
ZL	2	2	Kap. 4.1	ZL	8	8	Kap. 4.1
FLV	0.93	1.23	Anhang 2	FLV	0.95	1.26	Anhang 2
TLV	5'580	7'380	(6)	TLV	5'700	7'560	(6)
LS	174	231	(7)	LS	178	236	(7)
KLA	37'005	35'898	Anhang 3	KLA	37'005	35'898	Anhang 3
TKLA	1'764	2'272	(8)	TKLA	1'805	2'321	(8)
SK	33'865	44'789	(9)	SK	34'593	45'882	(9)
SP	0.17	0.17	Abb. 3	SP	0.17	0.17	Abb. 3
TKLA+SK	35'629	47'061		TKLA+SK	36'398	48'203	
EFD	1'466'925	1'470'525	(10)	EFD	1'501'365	1'516'245	(10)
KL	2.43	3.20	(11)	KL	2.42	3.18	(11)

Tabelle 14 Szenario Dübendorf			
Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel
ZL	24	24	Kap. 4.1
FLV	1.01	1.34	Anhang 2
TLV	6'060	8'040	(6)
LS	189	251	(7)
KLA	37'005	35'898	Anhang 3
TKLA	1'916	2'469	(8)
SK	23'798	31'573	(9)
SP	0.11	0.11	Abb. 3
TKLA+SK	25'714	34'042	
EFD	1'601'205	1'648'725	(10)
KL	1.61	2.06	(11)

Flottengrösse 12'000 Fallbeispiel 2018:

Tabelle 15 Szenario Tankstelle

Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel
ZL	2	2	Kap. 4.1
FLV	0.56	0.74	Anhang 2
TLV	6'720	8'880	(6)
LS	210	278	(7)
KLA	35'898	35'898	Anhang 3
TKLA	2'065	2'734	(8)
SK	40'784	53'893	(9)
SP	0.17	0.17	Abb. 3
TKLA+SK	42'849	56'627	
EFD	1'406'131	1'410'451	(10)
KL	3.05	4.01	(11)

Tabelle 16 Szenario Parkhaus

Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel
ZL	8	8	Kap. 4.1
FLV	0.58	0.77	Anhang 2
TLV	6'960	9'240	(6)
LS	218	289	(7)
KLA	35'898	35'898	Anhang 3
TKLA	2'144	2'842	(8)
SK	42'240	56'078	(9)
SP	0.17	0.17	Abb. 3
TKLA+SK	44'384	58'920	
EFD	1'448'371	1'466'611	(10)
KL	3.06	4.02	(11)

Tabelle 17 Szenario Dübendorf

Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel
ZL	24	24	Kap. 4.1
FLV	0.64	0.85	Anhang 2
TLV	7'680	10'200	(6)
LS	240	319	(7)
KLA	35'898	35'898	Anhang 3
TKLA	2'360	3'137	(8)
SK	30'159	40'055	(9)
SP	0.11	0.11	Abb. 3
TKLA+SK	32'519	43'192	
EFD	1'601'205	1'637'491	(10)
KL	2.06	2.64	(11)

Flottengrösse 6'000 Fallbeispiel 2030:

Tabelle 18 Szenario Tankstelle				Tabelle 19 Szenario Parkhaus			
Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel	Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel
ZL	2	2	Kap. 4.1	ZL	8	8	Kap. 4.1
FLV	0.50	0.58	Anhang 2	FLV	0.51	0.59	Anhang 2
TLV	3'000	3'480	(6)	TLV	3'060	3'540	(6)
LS	75	87	(7)	LS	77	89	(7)
KLA	49'500	49'500	Anhang 3	KLA	49'500	49'500	Anhang 3
TKLA	1'017	1'180	(8)	TKLA	1'044	1'207	(8)
SK	28'560	33'130	(9)	SK	29'131	33'701	(9)
SP	0.17	0.17	Abb. 3	SP	0.17	0.17	Abb. 3
TKLA+SK	29'577	34'310		TKLA+SK	30'175	34'908	
EFD	1'461'765	1'462'725	(10)	EFD	1'480'245	1'484'085	(10)
KL	2.02	2.35	(11)	KL	2.04	2.35	(11)

Tabelle 20 Szenario Dübendorf			
Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel
ZL	24	24	Kap. 4.1
FLV	0.54	0.63	Anhang 2
TLV	3'340	3'780	(6)
LS	81	95	(7)
KLA	49'500	49'500	Anhang 3
TKLA	1'098	1'288	(8)
SK	19'958	23'285	(9)
SP	0.11	0.11	Abb. 3
TKLA+SK	21'056	24'573	
EFD	1'533'525	1'543'605	(10)
KL	1.37	1.59	(11)

Flottengrösse 12'000 Fallbeispiel 2030:

Tabelle 21 Szenario Tankstelle				Tabelle 22 Szenario Parkhaus			
Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel	Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel
ZL	2	2	Kap. 4.1	ZL	8	8	Kap. 4.1
FLV	0.3	0.35	Anhang 2	FLV	0.31	0.36	Anhang 2
TLV	3'600	4'200	(6)	TLV	3'720	4'320	(6)
LS	90	105	(7)	LS	93	86	(7)
KLA	49'500	46'000	Anhang 3	KLA	49'500	46'000	Anhang 3
TKLA	1'221	1'323	(8)	TKLA	1'261	1'361	(8)
SK	34'272	39'984	(9)	SK	35'414	41'126	(9)
SP	0.17	0.17	Abb. 3	SP	0.17	0.17	Abb. 3
TKLA+SK	35'493	41'307		TKLA+SK	36'675	42'487	
EFD	1'399'891	1'401'091	(10)	EFD	1'422'451	1'427'251	(10)
KL	2.54	2.95	(11)	KL	2.58	2.98	(11)

Tabelle 23 Szenario Dübendorf			
Variable	Wert 1. Fall	Wert 2. Fall	Verwendete Formel
ZL	24	24	Kap. 4.1
FLV	0.35	0.40	Anhang 2
TLV	4'200	4'800	(6)
LS	105	120	(7)
KLA	46'000	46'000	Anhang 3
TKLA	1'323	1'512	(8)
SK	25'872	29'568	(9)
SP	0.11	0.11	Abb. 3
TKLA+SK	27'195	31'080	
EFD	1'493'491	1'507'891	(10)
KL	1.82	2.06	(11)



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Auslegung der Ladeinfrastruktur für automatisierte elektrische Fahrzeuge am Beispiel Zürichs

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Mathys

Vorname(n):

Florian

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt „Zitier-Knigge“ beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

Zürich, 10.12.2018

Unterschrift(en)

F. Mathys

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.

