



Die Zukunft der Mobilität - eine Chance für den öffentlichen Verkehr

Emilio Frazzoli,

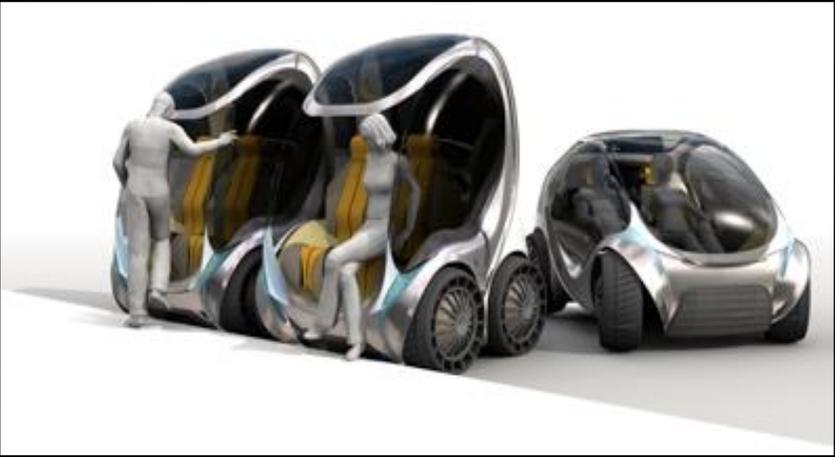
Claudio Ruch & Lukas Sieber

Institut für dynamische Systeme und Regelungstechnik, D-MAVT, ETH Zürich

öV-Branchenkonferenz 2018

Fachhochschule Nordwestschweiz, Olten

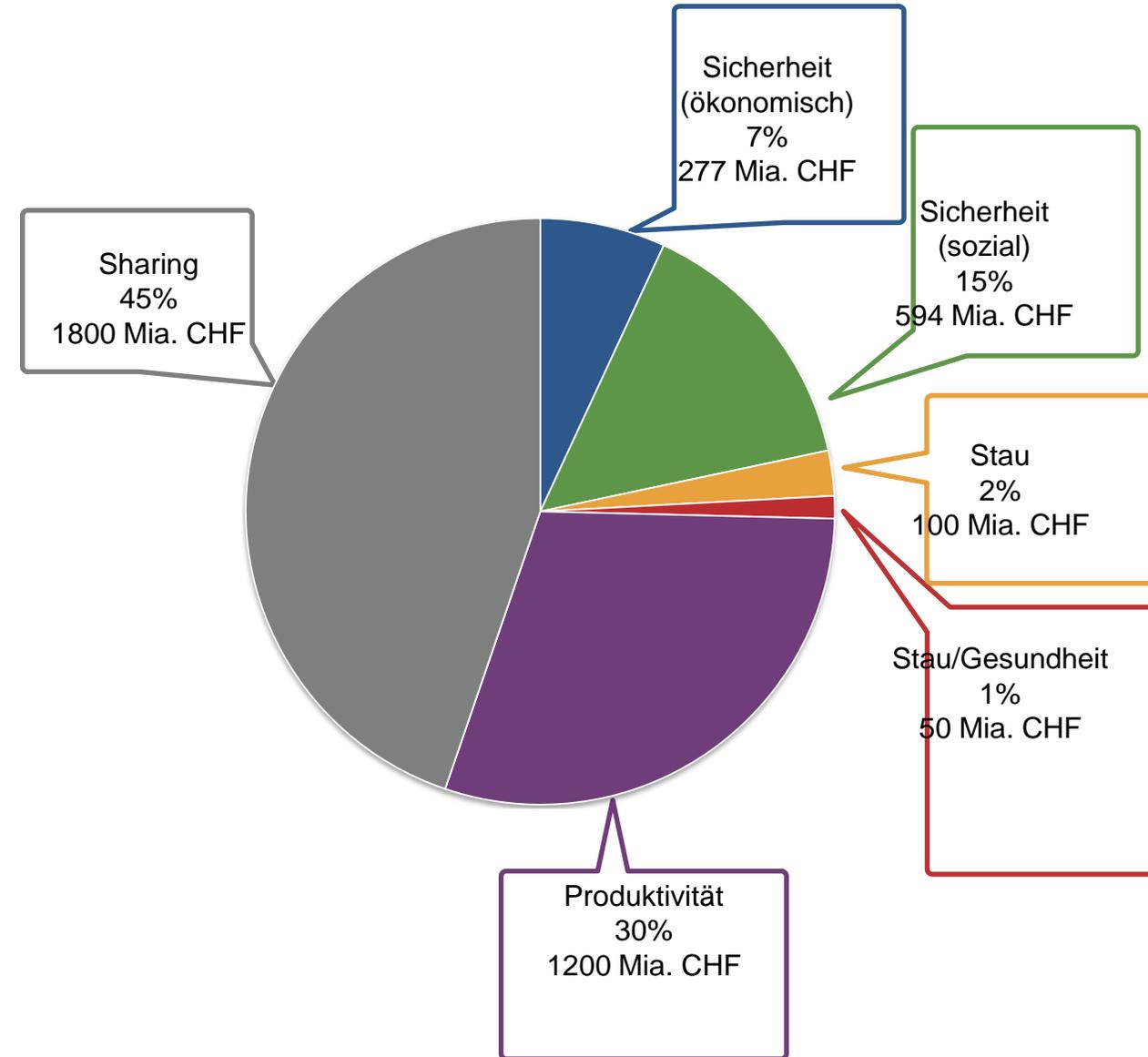
Warum selbstfahrende Autos?



Finanzielle Perspektive: US Markt

Wertsteigerung durch autonome Mobilität:

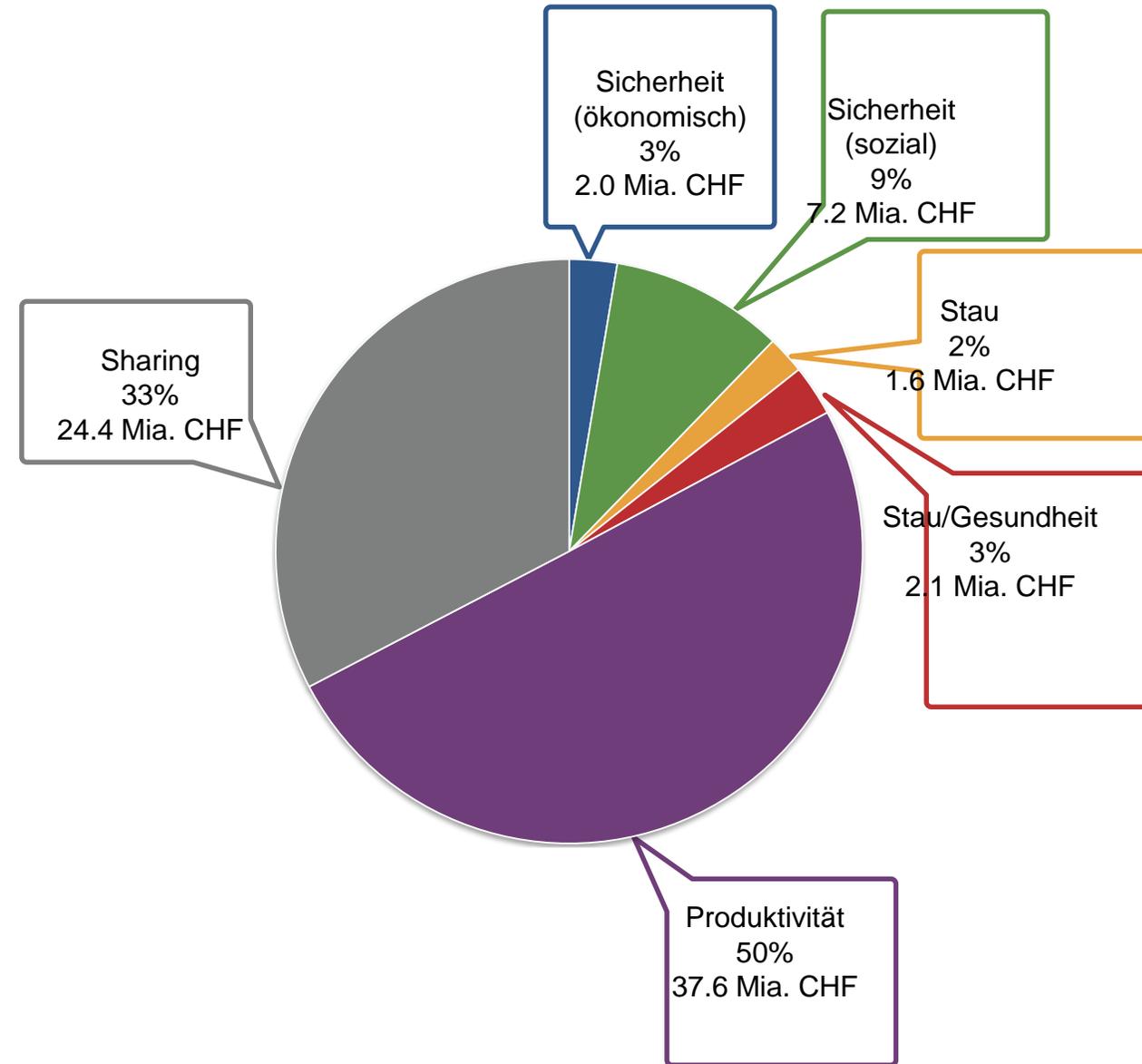
- Sicherheit:
 - “Kosten eines statistischen Lebens”: CHF 9.1 Mio.
 - 2014 NHTSA Bericht:
 - Ökonomische Kosten von Verkehrsunfällen: ~ CHF 277 Mia./Jahr.
 - Soziale Schäden durch Verkehrsunfälle: ~ CHF 594 Mia./Jahr
- Stau, verursachte Kosten:
 - Texas Transportation Institute, 2012: ~ CHF 100 Mia. /Jahr
- Stau, verursachte Gesundheitskosten:
 - Harvard School of Public Health, 2010: ~ CHF 50 Mia./Jahr
- Erhöhte Produktivität:
 - Geschätzte CHF 1200 Mia./Jahr
- Car sharing:
 - Unter Annahme eines “sharing factor” von 4, geschätzte CHF 1800 Mia./Jahr Wert für Nutzer.
 - Andere Studien [Burns et al., '13, Fagnant, Kockelman '14] schätzen höhere “sharing factors” bis zu ~10.



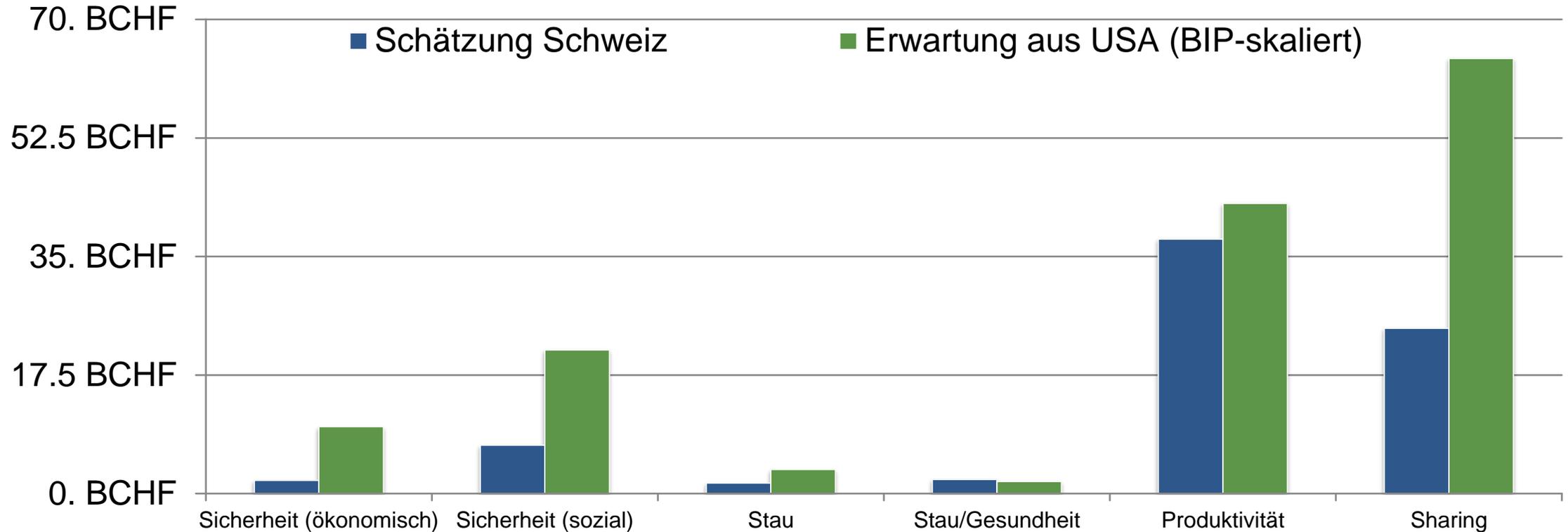
Finanzielle Perspektive: CH Markt

Wertsteigerung durch autonome Mobilität:

- Sicherheit:
 - “Kosten eines statistischen Lebens”: CHF 9 Mio
 - Schätzung basierend auf 2010 ARE Bericht und anderen:
 - Ökonomische Kosten von Verkehrsunfällen: ~ CHF 1'966 Mio. / Jahr.
 - Sozial Schäden durch Verkehrsunfälle: ~ CHF 7'158 Mio. /Jahr
- Stau, verursachte Kosten:
 - BFE, ARE Berichte 2010: ~ CHF 1'565 Mio. / Jahr
- Stau, verursachte Gesundheitskosten:
 - Verschiedene Berichte, geschätzte ~ CHF 2'097 Mio. / Jahr
- Erhöhte Produktivität:
 - Geschätzte ~ CHF 37'500 Mio. / Jahr
- Car sharing:
 - Unter Annahme eines “sharing factor” von 4, geschätzte CHF 24'400 Mio. / Jahr Wert für Nutzer.
 - Andere Studien [Burns et al., '13, Fagnant, Kockelman '14] schätzen höhere “sharing factors” bis zu ~10.



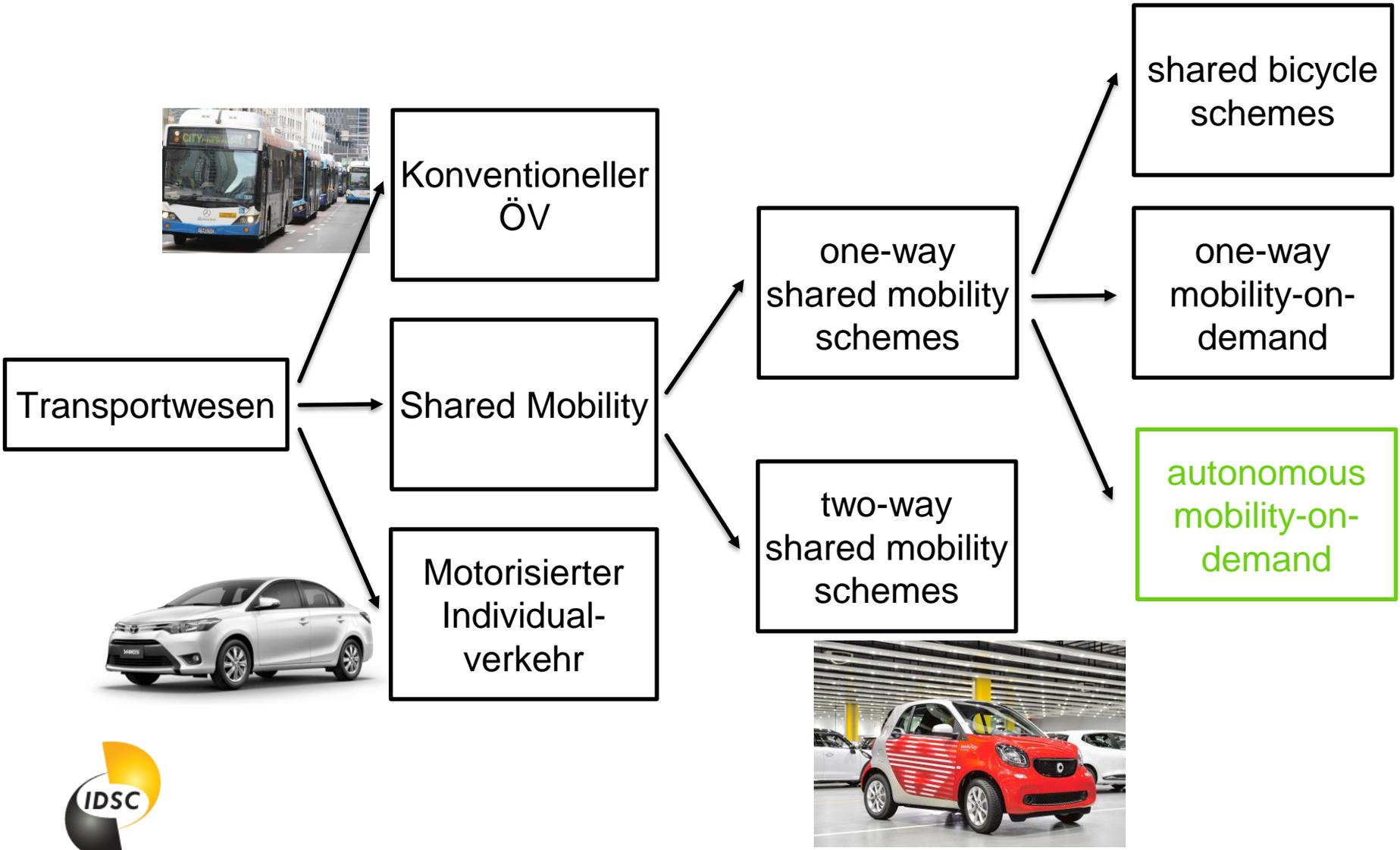
Finanzielle Perspektive: Unterschiede

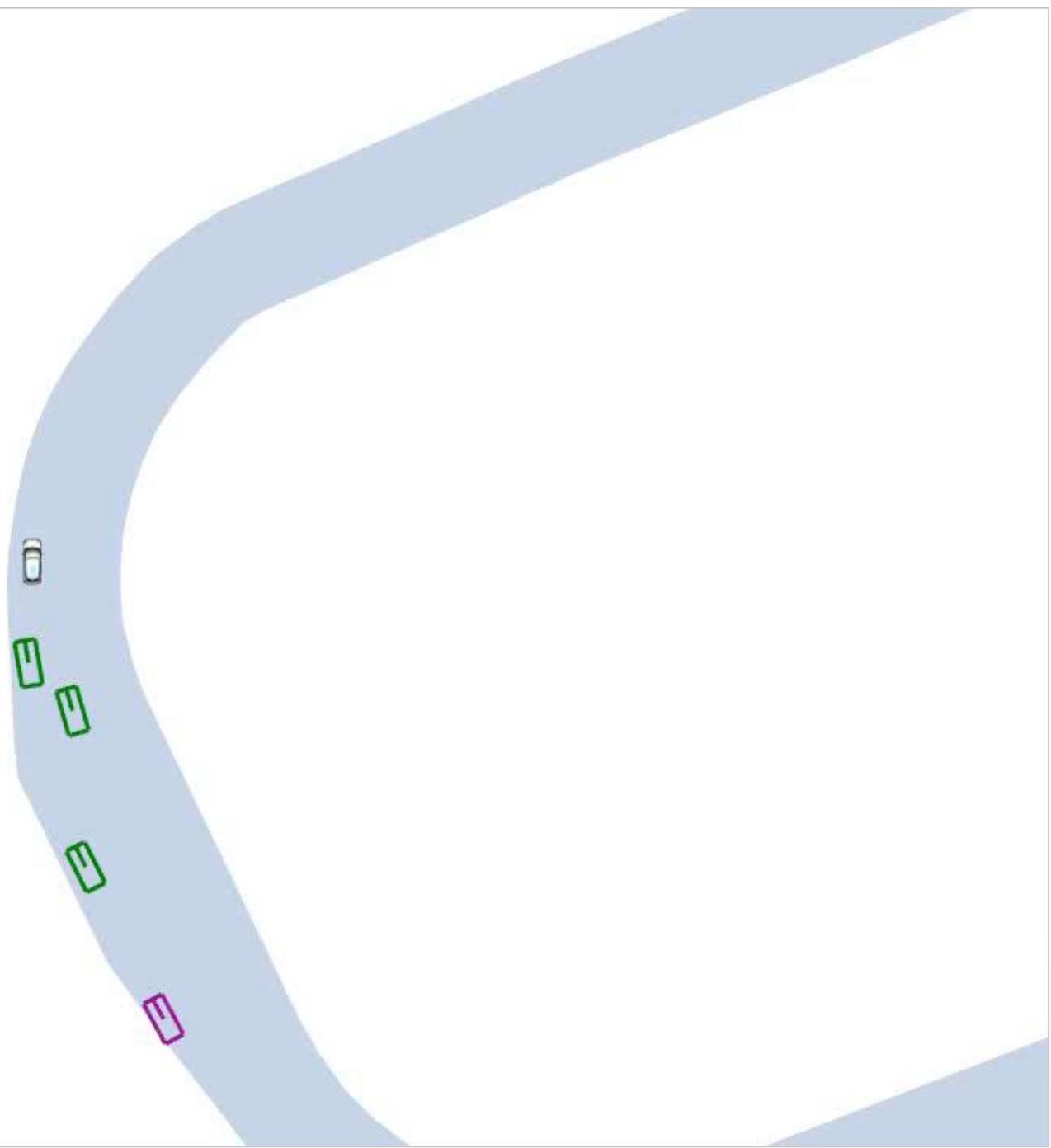


Tödliche Verkehrsunfälle pro Kopf 4.6 Mal höher in den USA (2016)

- Fahrzeuge / Kopf Faktor 1.41 höher in den USA
- Höherer Anteil des motorisierten Individualverkehrs in den USA (bspw. 57% in Chicago, 25% in

“Autonomous Mobility on Demand (AMoD)” im Kontext

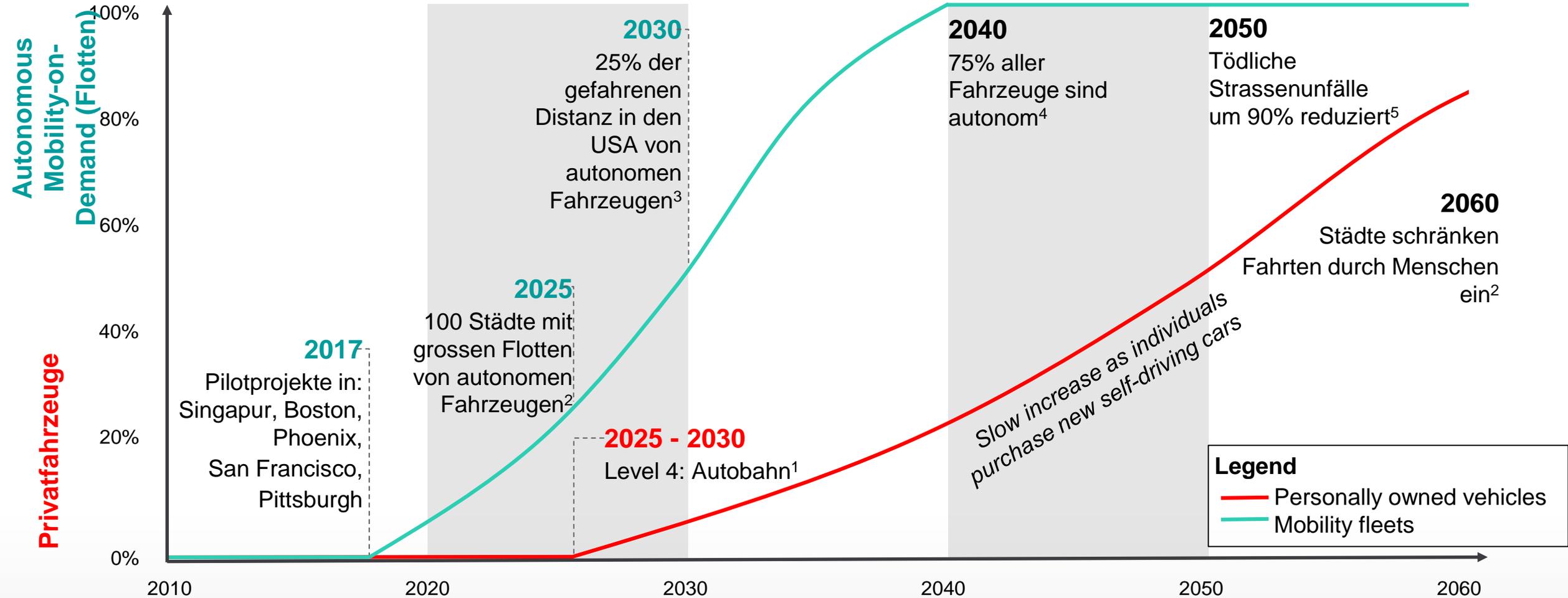




0.0 / 3.4 m/s
0.0 km/h
M **P** A D

WANN KOMMEN DIE AUTONOME FAHRZEUGE?

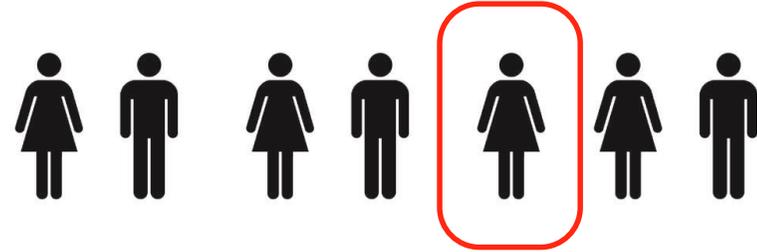
Verbreitung Level 4/5 autonomer Fahrzeuge



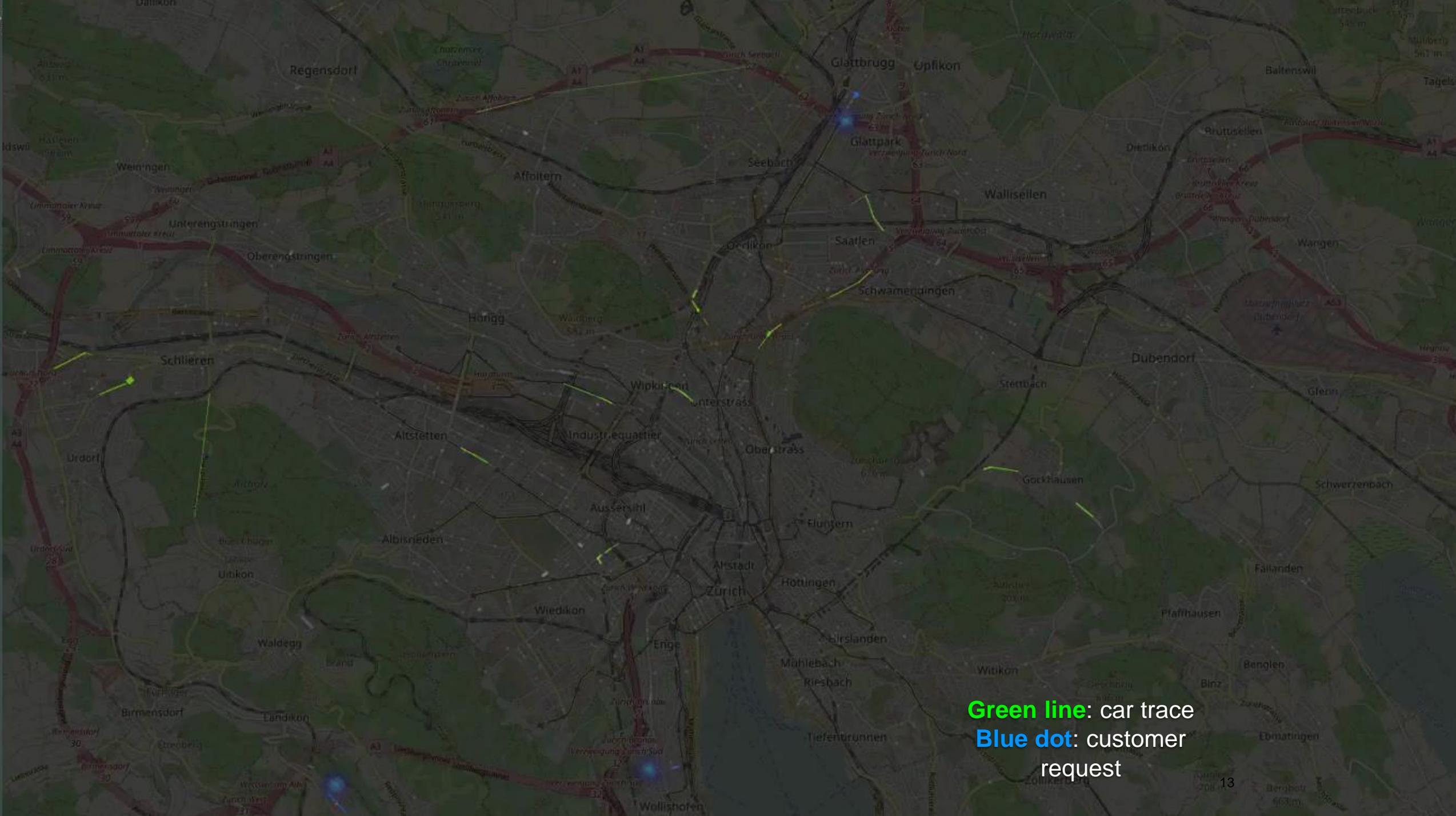
Arbeitsmarkt

Wenn Singapur nur Taxis verwenden würde:

- [Spieser, Treleaven, Zhang, Frazzoli, Morton, Pavone]: Transportbedürfnisse von Singapur könnten mit einer Flotte von 300'000 Fahrzeugen bedient werden.
- Unter einer konservativen Annahme von 2.5 FahrerInnen pro Fahrzeug würden 750'000 FahrerInnen benötigt aus einer Population von 5.399 Mio. Menschen
- **Eine von ~7** Personen würde als FahrerIn arbeiten.



Autonome Mobilität vernichtet keine Arbeitsplätze sondern ermöglicht eine neue Form des Transportwesens und den Einsatz menschlicher Ressourcen für produktivere Tätigkeiten.



Green line: car trace
Blue dot: customer request



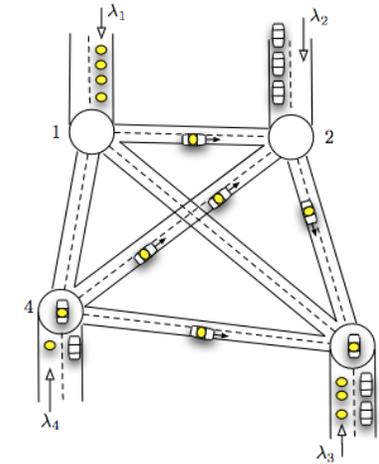
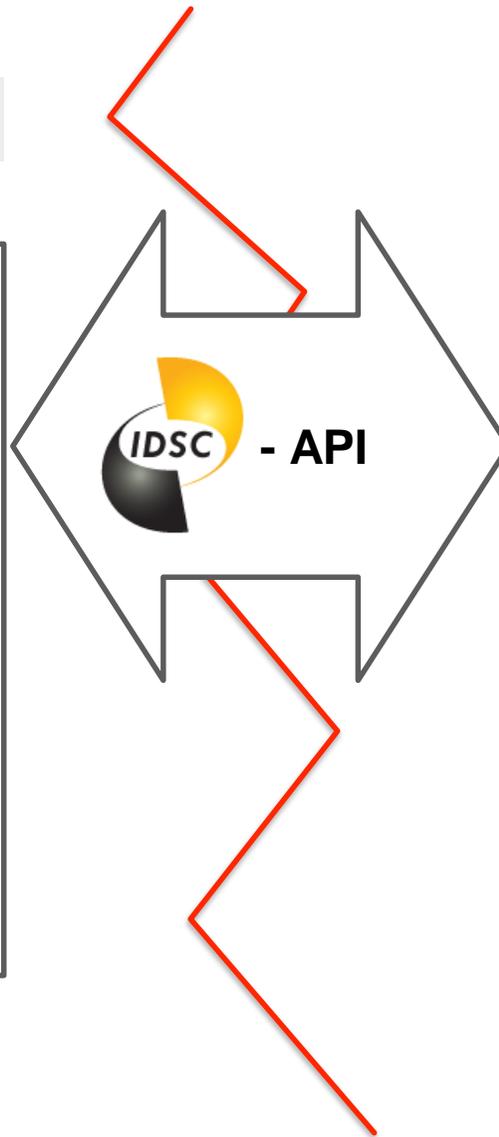
- API: Theorie trifft Realität

MATSim
Multi-Agent Transport Simulation

SIMMOBILITY

Simulations-Tools

- ✓ Auflösung bis zur Strasse
- ✓ Agentenbasiert.
- ✓ Umfassend.
- ✓ Effekte wie Kundenpräferenz, Stau etc. sind berücksichtigt.
- Schwierig zu erstellen und zu kalibrieren.
- AMoD normalerweise nicht integriert.
- Keine AMoD spezifischen Kenngrößen, anpassungsfähigen Visualisierungen.



e.g., Pavone, Marco, et al.
"Robotic load balancing for mobility-on-demand systems." The International Journal of Robotics Research 31.7 (2012): 839-854.

Theoretische Resultate

- ✓ Schlüssige Theorien und gesicherte Grenzwerte.
- ✓ Erkenntnisse dank analytischen Formeln.
- Vereinfachte Modelle bilden die Realität nicht genügend genau ab.
- Oft sind Resultate nicht auf genügend genauen Simulationen überprüft worden.

Fallstudie: Autonomous Mobility-on-Demand in Zürich

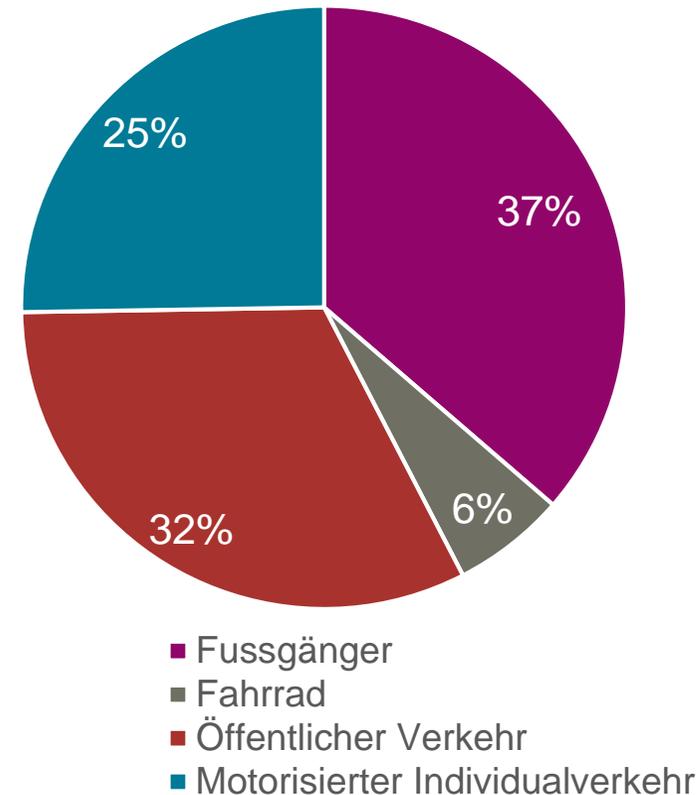
- Bevölkerung Stadt: 372'857
- Bevölkerung Metropolregion: 1'830'000
- 137'255 registrierte Privatfahrzeuge in der Stadt alleine ¹.
- Reiseverhalten ¹:

| | |
|------------------------------------|---------|
| Mittlere tägliche Distanz pro Kopf | 30.1 km |
| Mittlere Anzahl Fahrten pro Kopf | 3.4 |
| Mittlere tägliche Wegzeit pro Kopf | 101 min |

- Parking spaces in Zürich ¹:

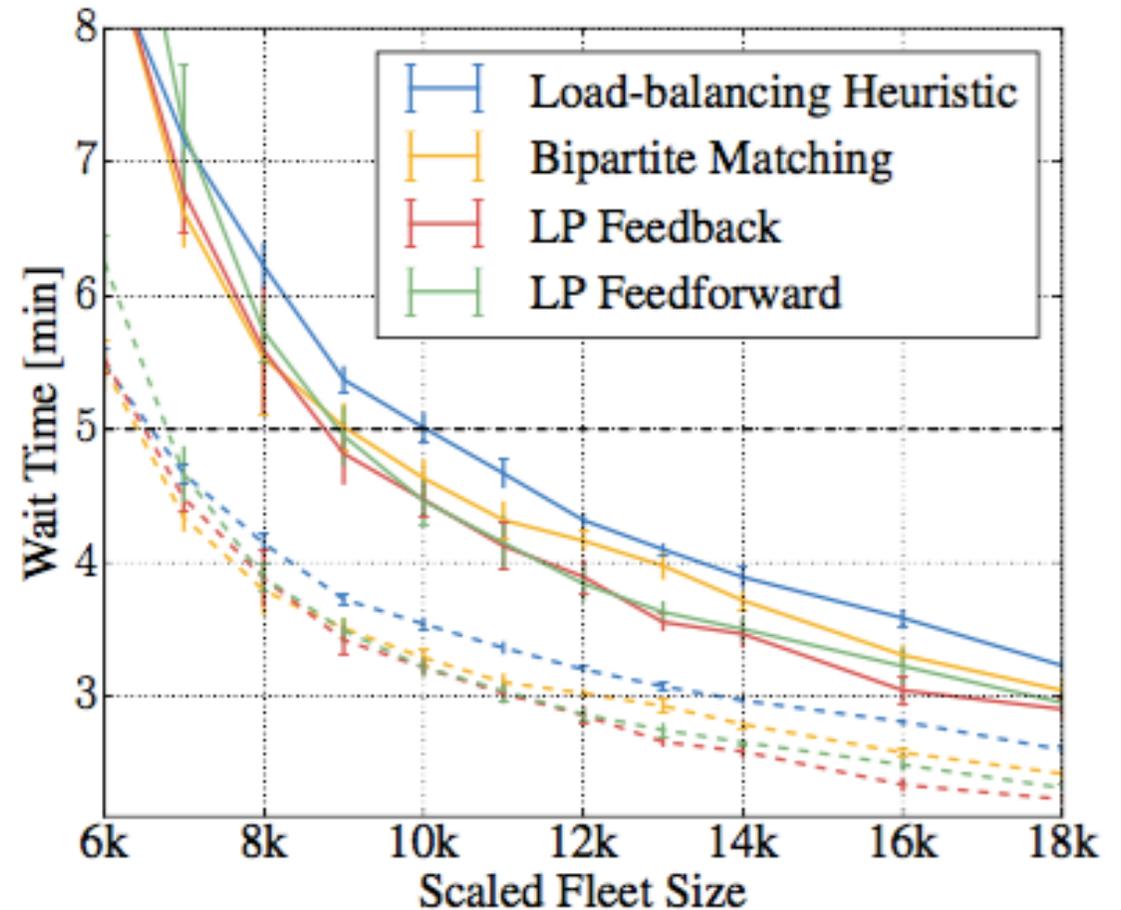
| | |
|--------------------------------------|---------|
| Parkplätze auf öffentlichen Strassen | 49'058 |
| Parkplätze auf privaten Grundstücken | 210'300 |
| Gesamtzahl der Parkplätze | 259'358 |
| (davon in Parkhäusern) | 18'023 |

- Verteilung nach Verkehrsmitteln ¹:



Fallstudie: Autonomous Mobility-on-Demand in Zürich

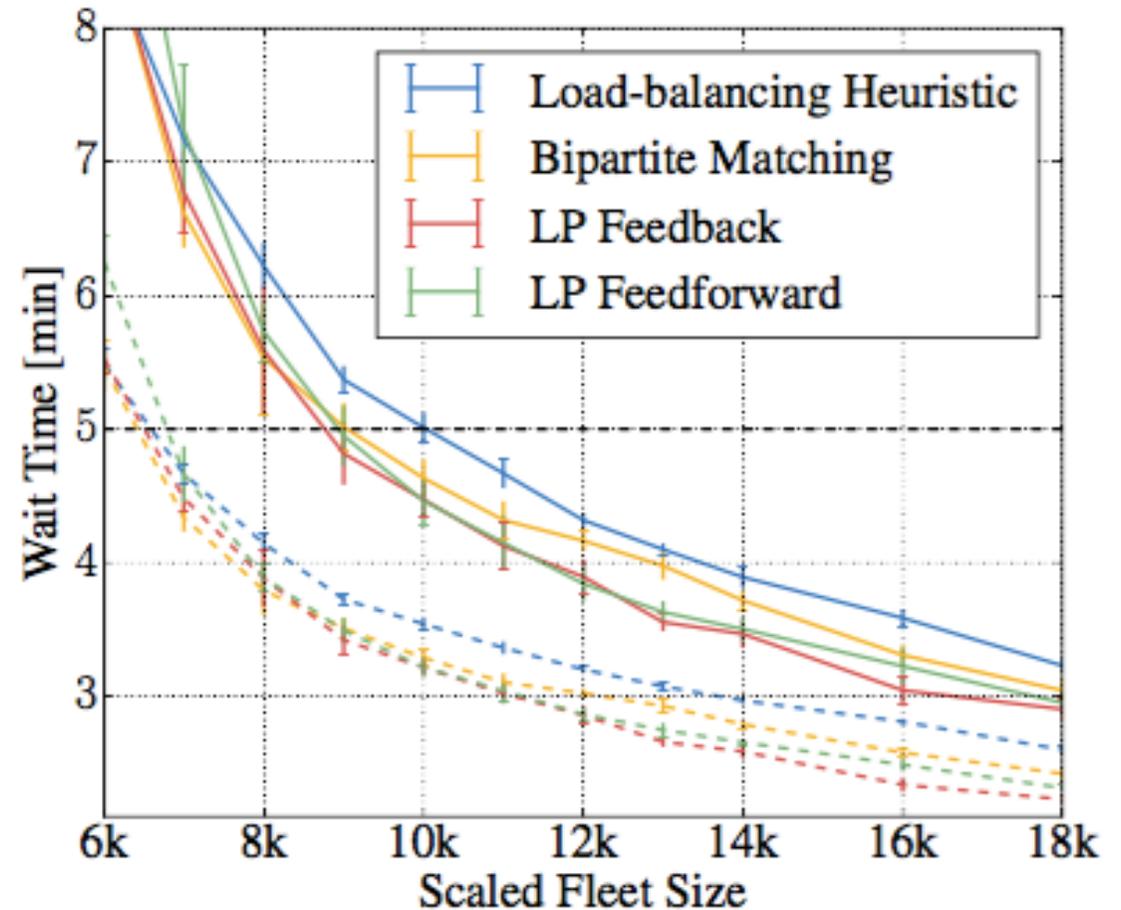
- (Simulations-) Bevölkerung von **97,000 Personen** mit einer Gesamtzahl von **209,600 Fahrten**.
- Betrieb mit vier verschiedenen Algorithmen:
 1. Heuristik
 2. Global Bipartite Matching (GBM)
 3. GBM + Feedforward linear program based rebalancing
 4. GBM + Feedback linear program based rebalancing
- **5 mins mittlere Wartezeit** bei Spitzenzeiten erreichbar mit einer Flotte von
 - 10,000 Fahrzeugen (Heuristik)
 - **8,700 Fahrzeugen** (bester Algorithmus)
- Fahrzeug-Auslastung höher als der Schnitt von 1.32 h / Tag in der Schweiz :
 - 4.8 h bei Flottengrösse 6,000.
 - 2.16 h bei Flottengrösse 18,000



Mittlere Wartezeit zu Spitzenzeiten (durchgezogene Linie) und für den gesamten Tag (gestrichelte Linie).

Fallstudie: Autonomous Mobility-on-Demand in Zürich

- Ergebnis
 - Heute: **2.71** Einwohner pro Fahrzeug.
 - Mit AMoD: **9.7** Einwohner pro Fahrzeug führt bereits zu hervorragender Qualität.
 - Die Flottensteuerung (Algorithmus etc.) hat einen Grossen Einfluss auf die Effizienz des Systems.
- Welche Preise sind für AMoD in Zürich zu erwarten?



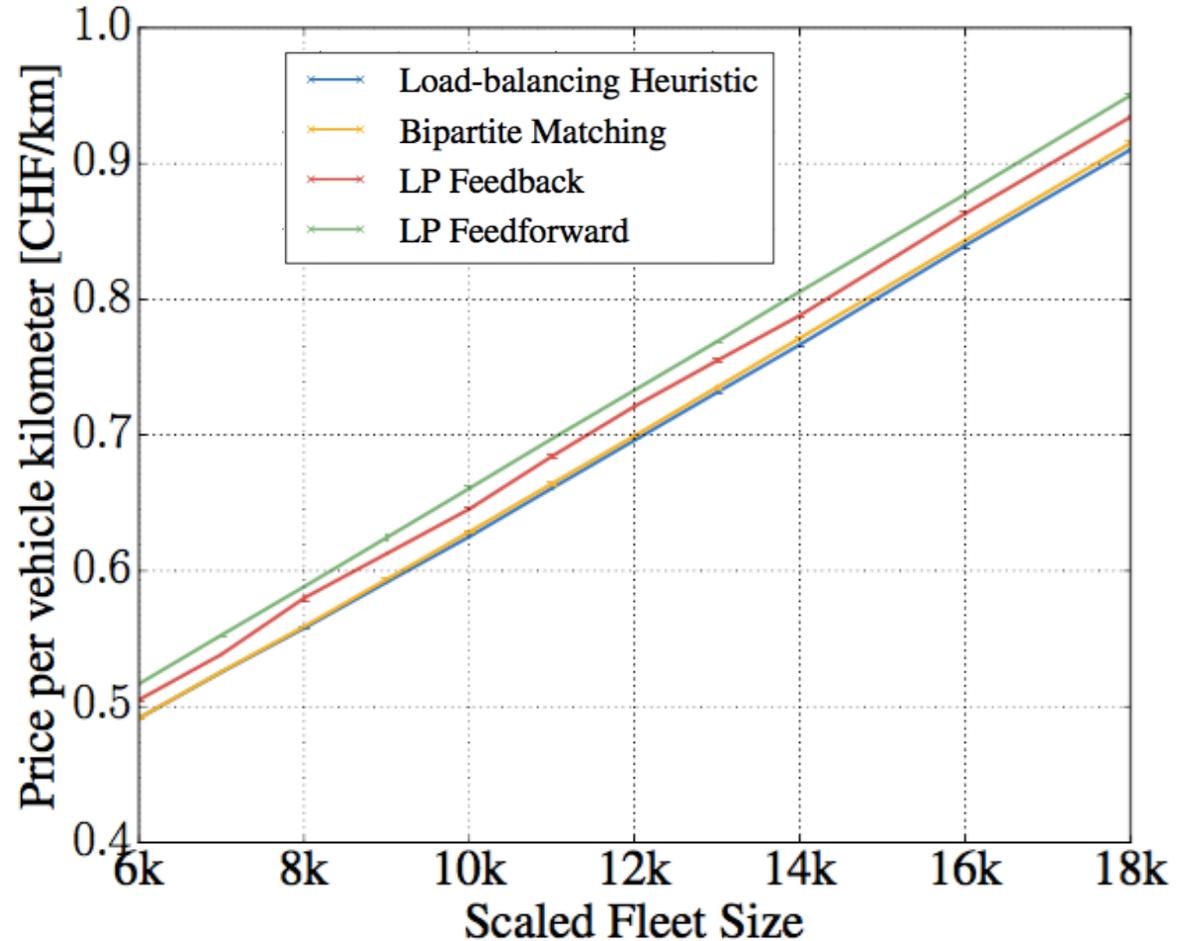
Mittlere Wartezeit zu Spitzenzeiten (durchgezogene Linie) und für den gesamten Tag (gestrichelte Linie).

Fallstudie: Autonomous Mobility-on-Demand in Zürich

- Heutige Taxipreise in Zürich:
8 CHF base plus 5 CHF/km
- Durchschnittliche Vollkosten eines Privatfahrzeuges (“value of time”):
~1.2 CHF/km
- Subventionierte Kosten öffentlicher Verkehr:

0.25

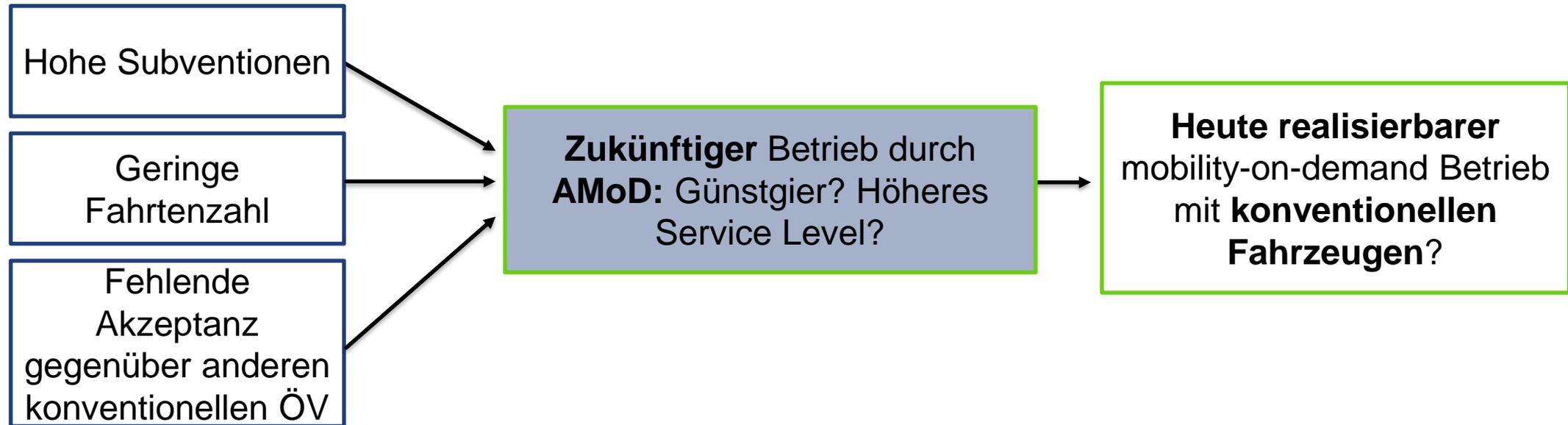
Komfort wie Privatverkehr, Preise ähnlich konventionellem öffentlichem Verkehr.
Wie wird so ein Service die Transportwelt verändern?



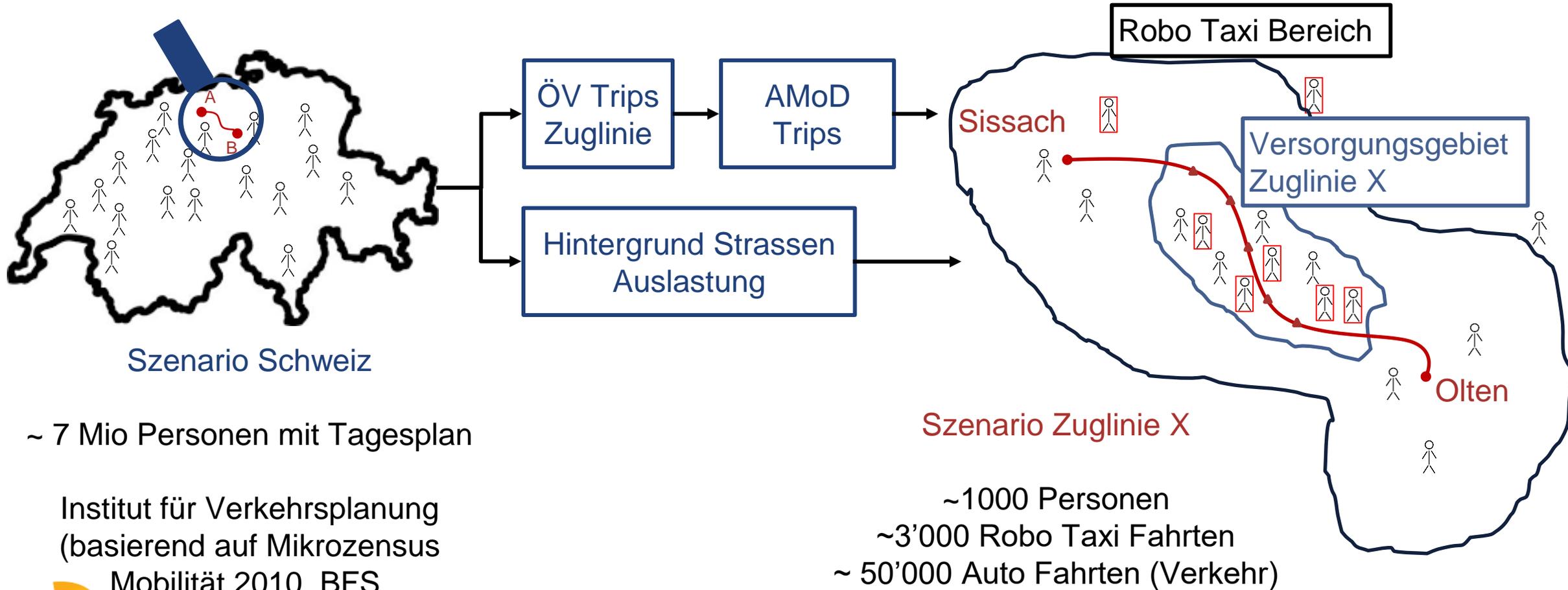
Minimalpreis pro AMoD - Kilometer bei 3% Marge.

Aktuelle Forschung: AMoD als zukünftiger ÖV bei geringer Auslastung?

- Einige Zuglinien in der Schweiz werden zu weniger als 25% durch Billet - Erlöse finanziert.
- Schliessungsversuche erfolglos, da die Bevölkerung Buslinien als minderwertig betrachtet.



Aktuelle Forschung: Beispiel «Läufelfingerli» S9 Olten-Sissach

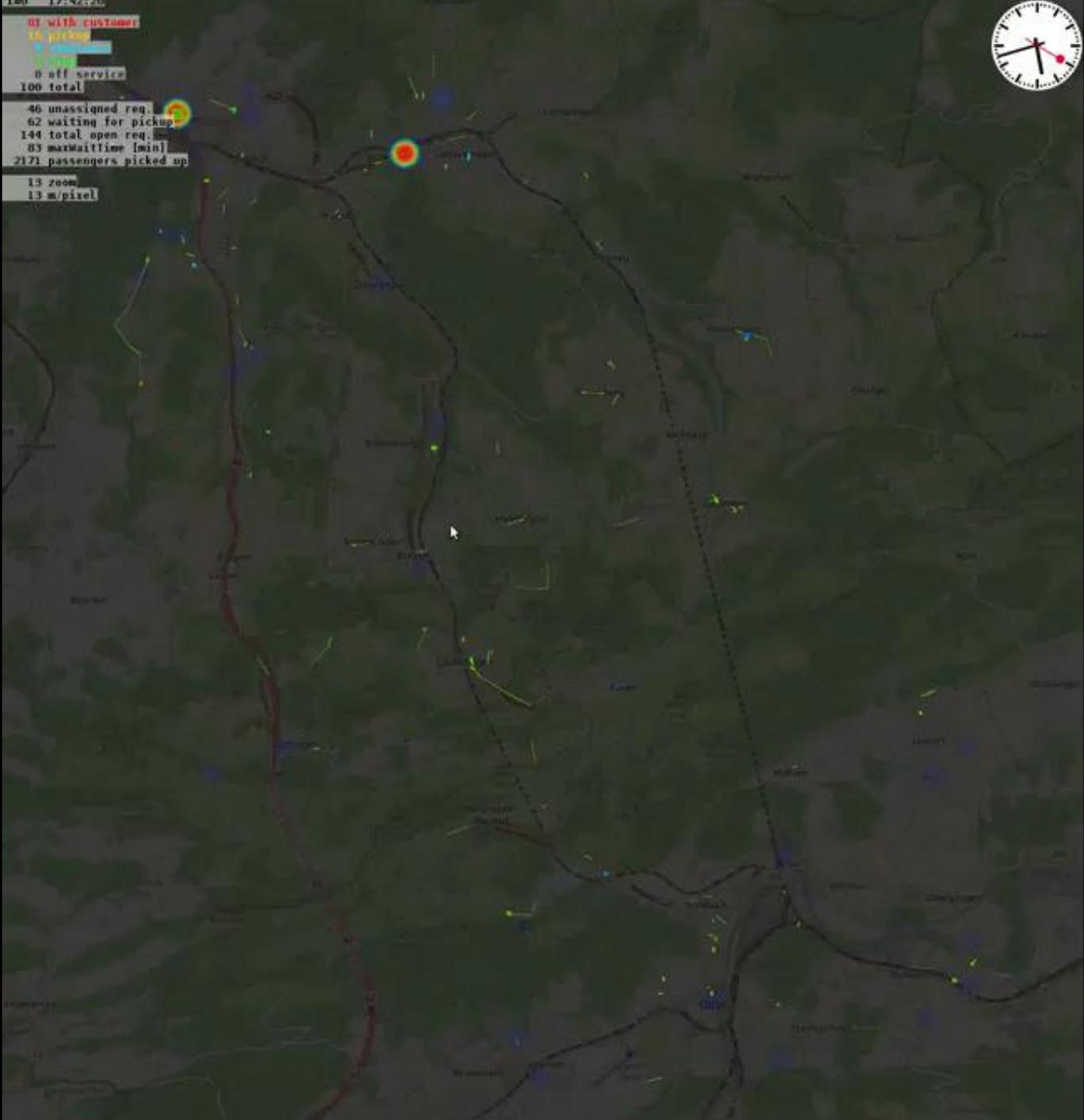


time 17:42:20

01 with customer
16 pickup
0 drop
0 off service
100 total

46 unassigned req.
62 waiting for pickup
144 total open req.
83 maxWaitTime [min]
2171 passengers picked up

13 zoom
13 m/pixel



Vorläufige Resultate: Fahrzeugstatus bei 120 Fahrzeugen

- Fahrzeugstatus

- Stay

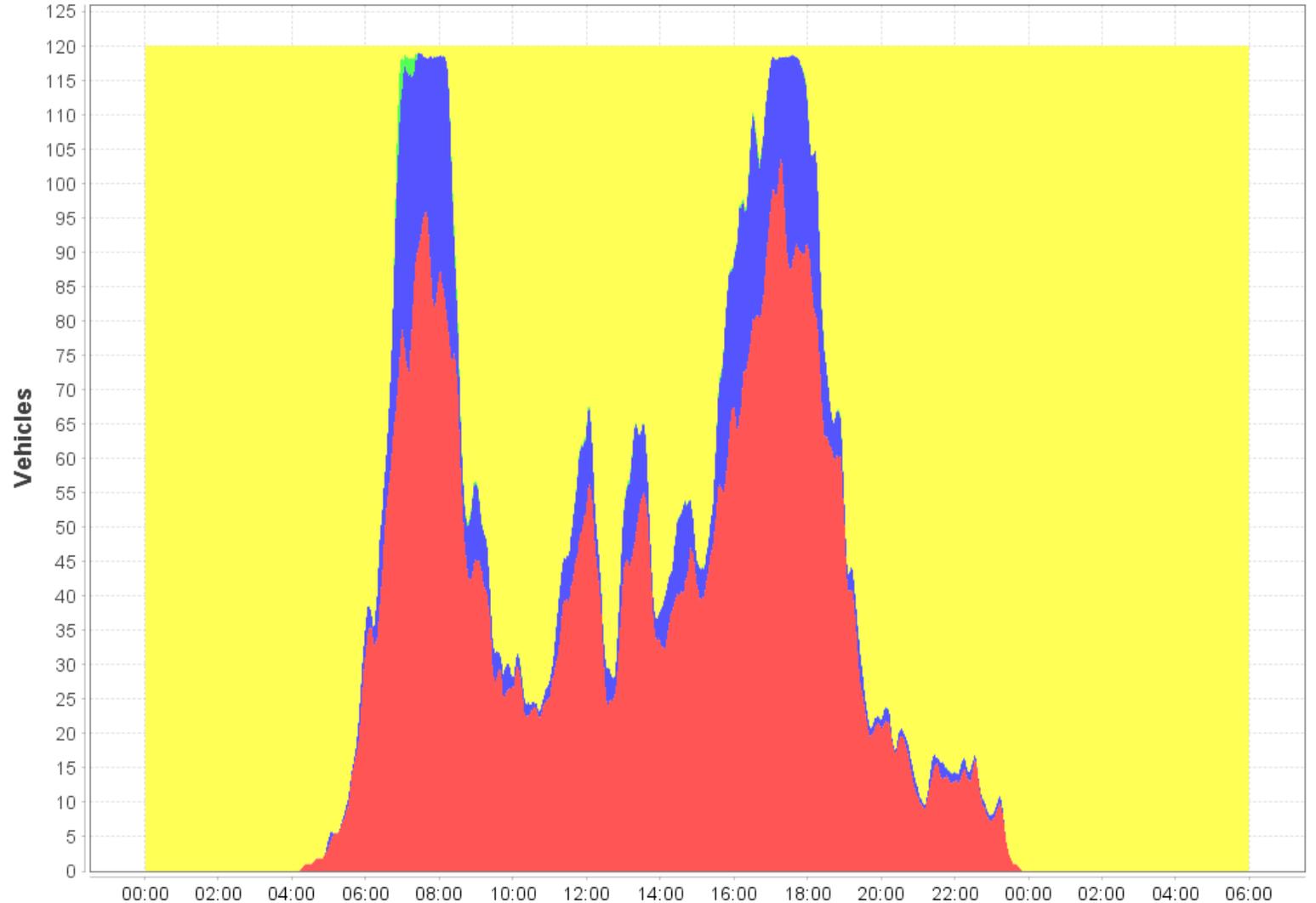
- Abholen von Kunden

- Rebalancing

- Mit Kunde

- **120** autonome Fahrzeuge

decken Bedarf voraussichtlich gut.



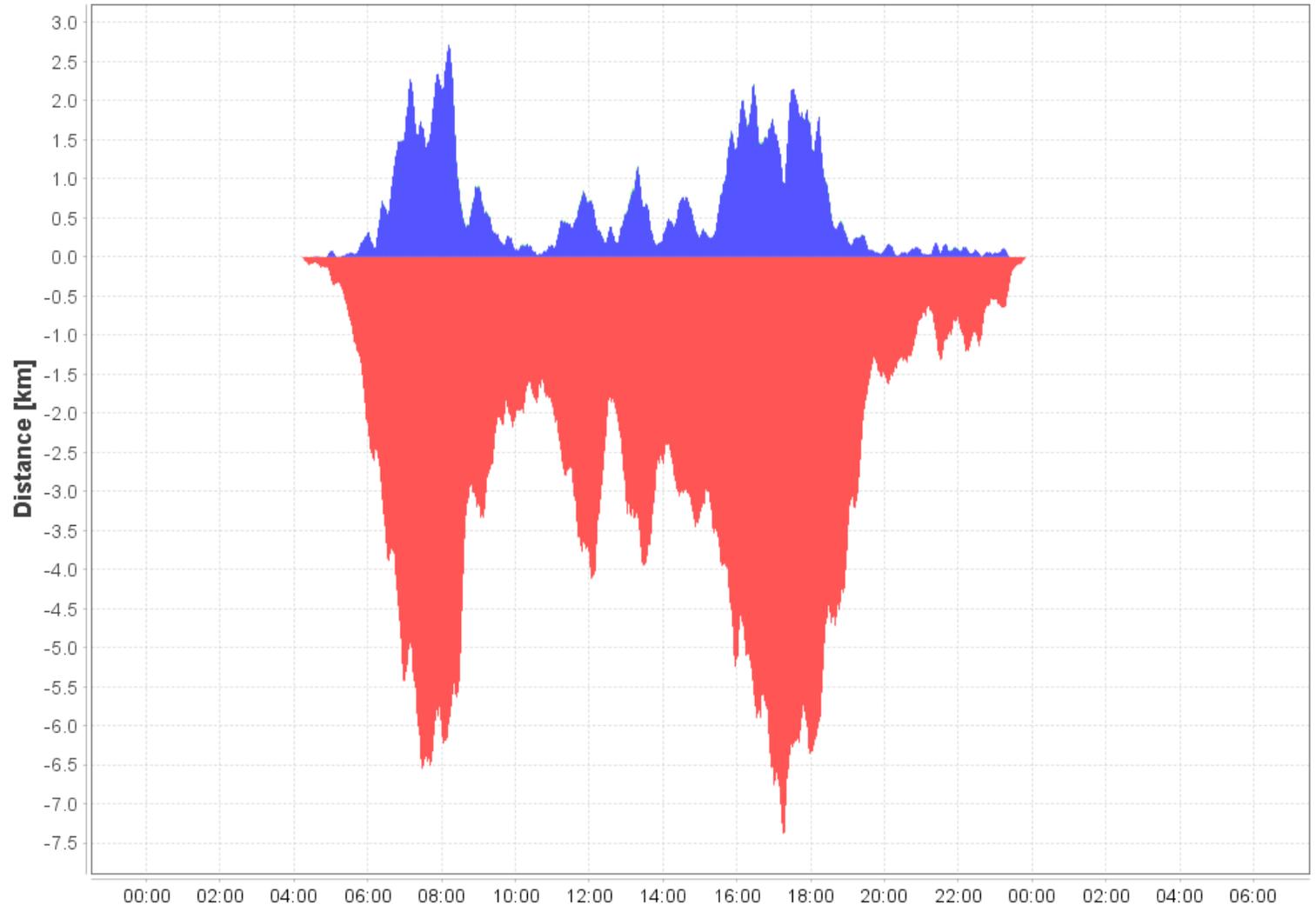
Vorläufige Resultate: Flottendistanzen bei 120 Fahrzeugen

- **Flottendistanzen**

- Abholen von Kunden

- Mit Kunde

- **Unit-Capacity**, mehrere Kunden Pro Fahrzeug können Effizienz weiter steigern.



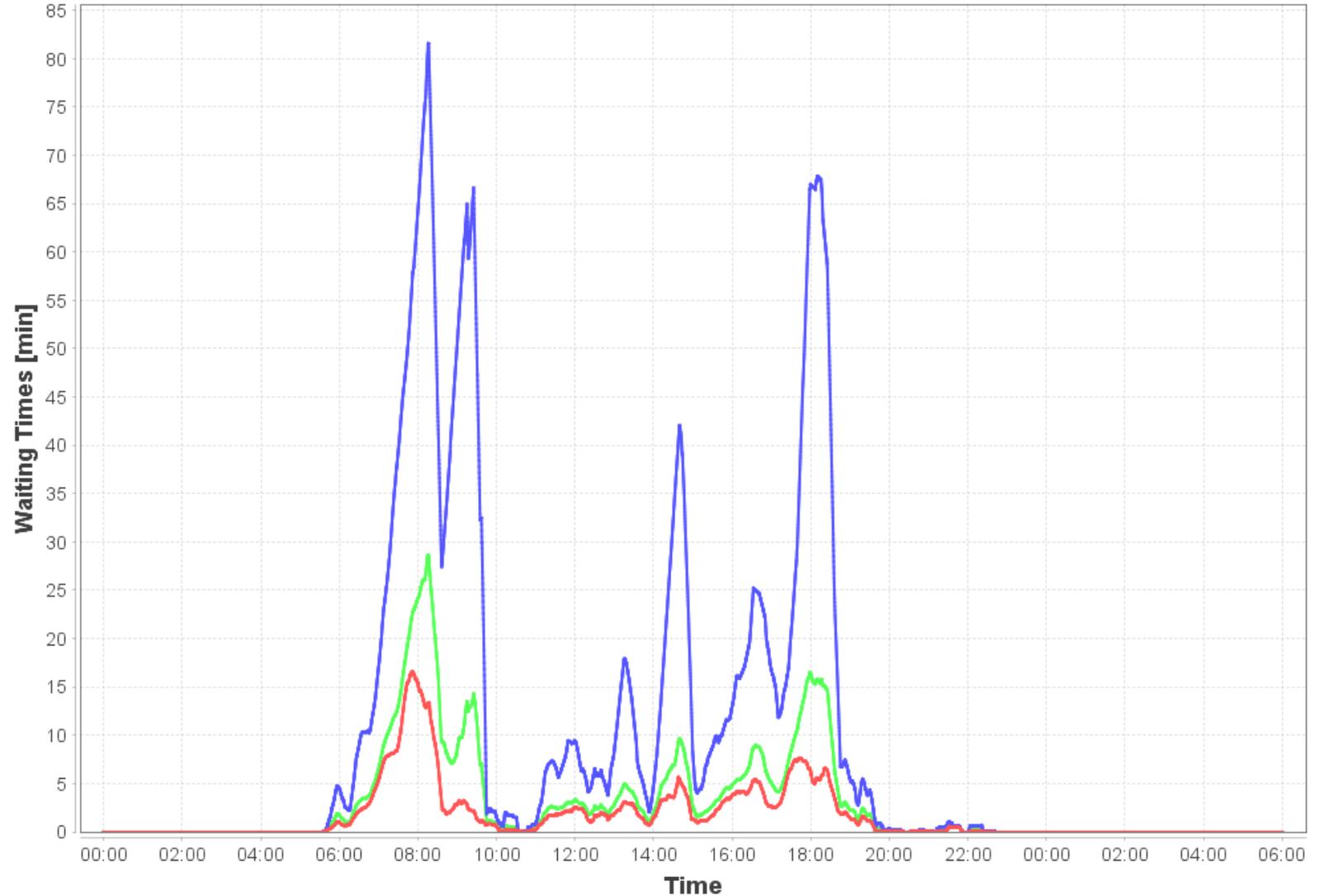
Vorläufige Resultate: Wartezeiten bei 120 Fahrzeugen

- **Wartezeiten**

- 95% Quantil ●
- 50% Quantil ●
- Mittelwert ●

- Können **120** on-demand Fahrzeuge den Bedarf mit mittleren Wartezeiten < 15 min (Stosszeit) ungefähr

4-5 min im Tag abdecken?



Schlussfolgerungen

- Level-4 autonome Fahrzeuge ermöglichen eine "Einweg"-Mobilität in großem Maßstab.
- **Schlüsselkompromiss für Mobilität: Durchsatz vs. Verzögerung in Abhängigkeit von Raum und Zeit**
- Der öffentliche Nahverkehr bietet einen hohen Durchsatz durch leistungsstarke Fahrzeuge.
- AMoD kann einen zusätzlichen Betriebspunkt durch höhere Verfügbarkeit und Reaktionsfähigkeit bei Fahrzeugen mit geringerer Kapazität bieten.
 - First- und Last-Mile-Verbindungen machen den Nahverkehr attraktiver;
 - Bieten Sie eine attraktive Alternative zu wenig ausgelasteten Routen.

