





Towards Welfare Optimal Operation of Shared Autonomous Vehicles

Ihab Kaddoura, Joschka Bischoff

Technische Universität Berlin Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik

Motivation

Shared autonomous vehicles (**SAV**) / Geteilte autonome Fahrzeuge vs.

Conventional driver-controlled private cars (**CC**) / nicht-automatisierte private Fahrzeuge

Möglichkeiten:

- Verbesserung der Angebotsqualität bei gleichen Kosten
- Kosteneinsparungen bei gleicher Angebotsqualität
- Umgestaltung des öffentlichen Raums
- Elektrifizierung
- ..



https://meetolli.auto/

Herausforderungen

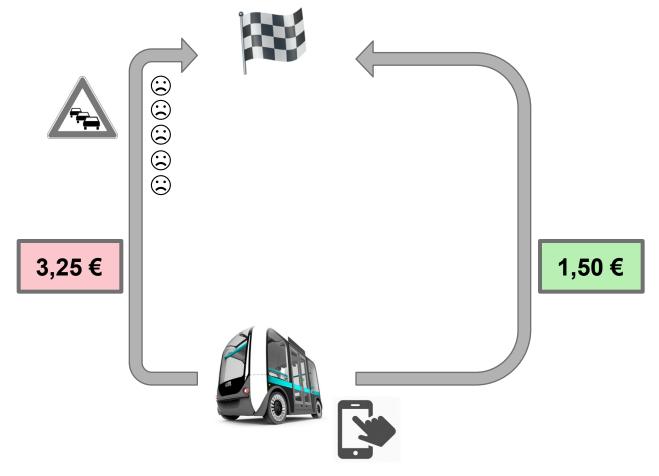
- Zusätzliche Fahrten (Leerfahrten, induzierter Verkehr?, ...)
- (nach wie vor) negative Wirkungen von Verkehr: Stau, Lärm, (NOx), ...
- •

Wie können die negativen Wirkungen eingedämmt und die Potentiale von SAV genutzt werden?

Idee

→ Eingriff in den Betrieb / die Bedienkonzepte der SAV-Unternehmen

- Direkt → Bordcomputer / Zentrale
- Indirekt → Bepreisung der SAV-Unternehmen (bzw. der SAV-Nutzer)



3

Agenda

1. Methodik

- SAV-Steuerung
- Agenten-basierte Verkehrssimulation

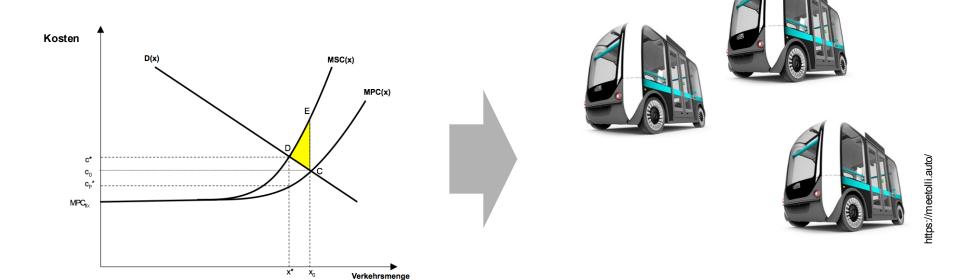
2. Anwendung

- Simulationsexperimente
- Ergebnisse

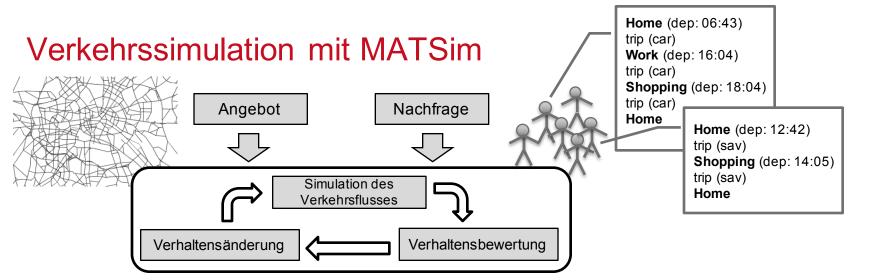
3. Fazit und Ausblick

Methodik: SAV-Steuerung

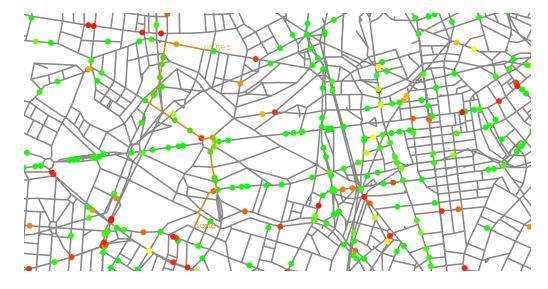
eigene Abbildung



- Anwendung der ökonomischen Theorie auf den SAV-Markt
- Internalisierung externer Kosten (Pigou-Steuer) → Wohlfahrtsmaximierung
- Fokus dieser Studie: Staukosten + Lärmexposition
- Berücksichtigung externer Kosten bei...
 - ... der Zuordnung von Fahrtanfrage und Fahrzeug
 - ... der Routenwahl (mit Fahrgast vs. ohne Fahrgast)



- Multi-Agenten Transport Simulation (www.matsim.org)
- Individuelle Nutzenmaximierung durch iteratives Lernen
- Berücksichtigung stochastischer Effekte
- Annäherung an ein Nutzergleichgewicht





Shared autonomous vehicles (SAV) in MATSim





Kartenmaterial: OpenStreetMap

Abschätzung optimaler Staupreise

Staumodell = simuliertes Warteschlangenmodell, also keine differenzierbare Funktion

Simulationsbasierte Staubepreisung

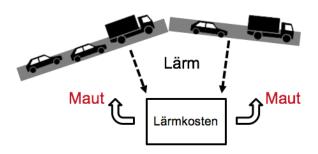
- Staupreisberechnung auf Basis des Staulevels (d) der vorherigen Iterationen (k bzw. k-1)
- Räumlich (pro Kante r) und zeitlich (pro Zeitintervall t) differenzierte Preise
- Nutzung eines kontroll-theoretischen Ansatzes

$$m_{r,t,k} = max\{0, K_p \cdot d_{r,t,k} + K_i \cdot D_{r,t,k} + K_d \cdot (d_{r,t,k} - d_{r,t,k-1})\}$$

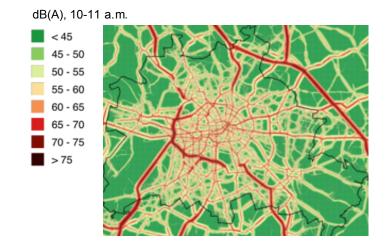
 \rightarrow Discrete Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller K_p , K_i , K_d : Tuning-Parameter



Abschätzung optimaler Lärmpreise



- Verwendung der RLS-90 Methodik (vereinfacht) zur Lärmberechnung; Kostenberechnung nach EWS
- Grenzkostenbepreisung auf Basis des Verkehrsgeschehens in der vorherigen Iteration
- Räumlich, zeitlich und nach Nutzergruppen differenzierte Preise



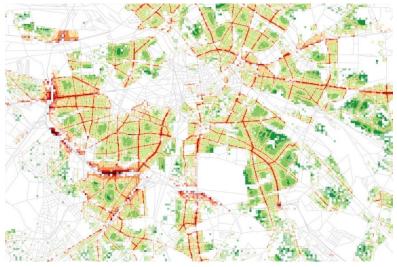
Kaddoura, I., Kröger, L. and Nagel, K.; An activity-based dynamic approach to calculate road traffic noise damages. Transportation Research Part D: Transport and Environment, doi: 10.1016/j.trd.2017.06.005

Kaddoura, I., Kröger, L. and Nagel, K.; User-specific and Dynamic Internalization of Road Traffic Noise Exposures. Networks and Spatial Economics. doi: 10.1007/s11067-016-9321-2

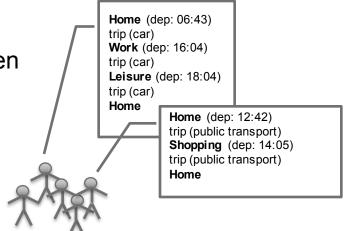
Lärmbetroffenheit

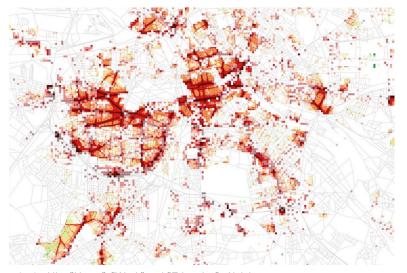
Berücksichtigung dynamischer Bevölkerungsdichten

Aktivitäten-basierter Simulationsansatz



21-22 Uhr, nur "Home" Aktivitäten





14-15 Uhr, "Home", "Work" und "Education" Aktivitäten

Ergebnisse vorheriger Studien

 Nutzung von MATSim zur Internalisierung externer Kosten → veränderte Routen-, Zeit- bzw. Verkehrsmittelwahl → geringere Stau- und Lärmwirkung → Wohlfahrtsgewinn

Kaddoura, I. & Nagel, K.: Simultaneous internalization of traffic congestion and noise exposure costs *Transportation*, **2017**, doi: 10.1007/s11116-017-9776-0

- Ersetzen aller privater Pkw-Fahrten in Berlin (ca. 1 Mio.) durch 100.000
 SAV → Wartezeiten von unterhalb 10min in der Innenstadt
- Nutzungsmuster und Betriebszeiten in Berlin bieten ausreichend Standzeiten für Ladevorgänge

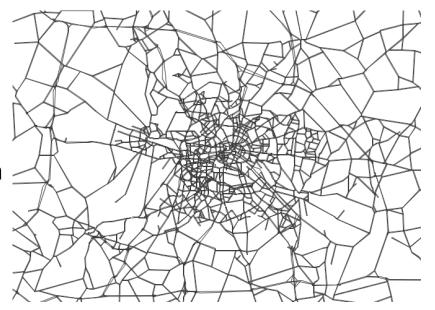
Bischoff, J. & Maciejewski, M.: Autonomous taxicabs in Berlin -- a spatiotemporal analysis of service performance; *Transportation Research Procedia, mobil.TUM 2016, 2016a, 19*, 176-186.

Bischoff, J. & Maciejewski, M.: Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin; *Procedia Computer Science*, **2016b**, *83*, 237-244.

Fallstudie

Großraum Berlin

Verkehrsnetz: alle Hauptverkehrsstraßen



 Verkehrsnachfrage: Nachfrageerzeugung anhand von Erhebungsdaten (u.a. SrV 2008; Pendlerstatistik der Bundesagentur für Arbeit); Kalibrierung anhand zeit- und kantenfeinen Kfz-Zählungen

Ziemke, D.; Nagel, K. & Bhat, C.; Integrating CEMDAP and MATSim to increase the transferability of transport demand models; *Transportation Research Record*, **2015**, *2493*, 117-125; all data is publicly available at https://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/

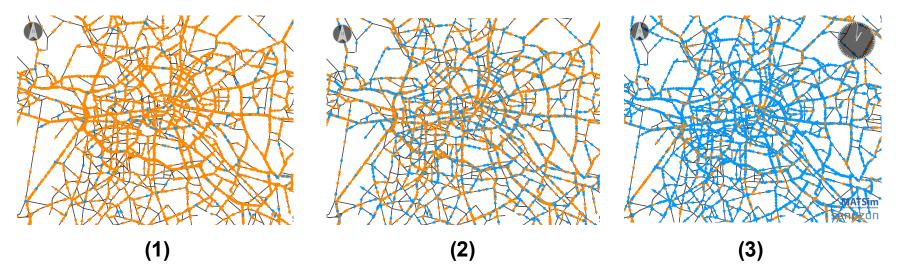
Simulationsexperimente

Nullfall (0):

Business as usual, sämtliche Fahrten werden mit dem privaten Pkw durchgeführt (keine SAV)

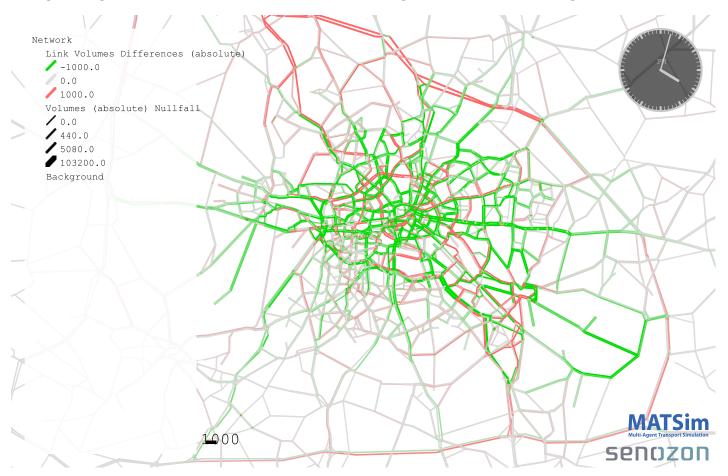
Planfälle:

- Umwandlung von 10% (1), 50% (2), 100% (3) aller CC-Fahrten innerhalb des Stadtgebiets in SAV-Fahrten
- Definition einer "geeigneten" Flottengröße (Ausgangspunkt: Verhältnis 1:10, dann: Verdopplung der SAV-Flotte um mehr Luft für Optimierung zu haben, also: 20.000 SAVs für (1), 100.000 SAVs für (2), 200.000 SAVs für (3)
- Mit Bepreisung von SAV (a) vs. keine Bepreisung von SAV (b)



Ergebnisse: Reisezeiten und Distanzen

- SAV → höheres Verkehrsaufkommen durch Leerfahrten
- starke Zunahme der Personen-h
- geringe Zunahme der Fahrleistung (primär durch gute SAV-Verfügbarkeit)



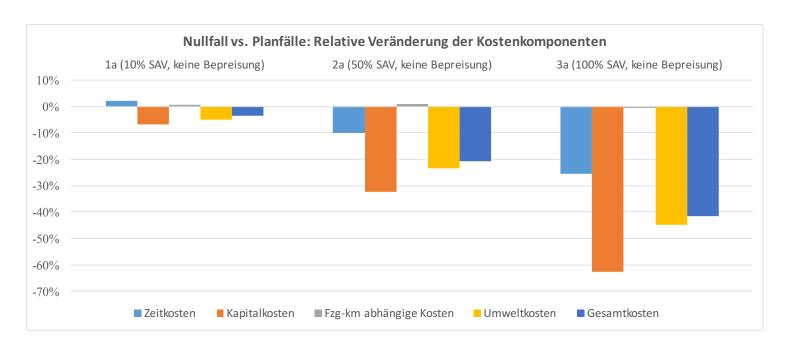
Gesamtwirtschaftliche Bewertung: Annahmen

Kostenkomponente	Kostensatz	Annahme bzw. Quelle
Zeit im CC	6 EUR / Personen-h	BVWP 2030, Zeitwert für nicht-geschäftliche Fahrtzwecke < 25 km
Zeit im SAV	3 EUR / Personen-h	Annahme: ca. die Hälfte des Zeitwertes für CC durch sinnvolles Nutzen der Zeit (?)
Wartezeit auf SAV	0,00 EUR	Annahme: die Zeit wird am Aktivitätsort "genutzt", vorab- Buchung (?)
(fahrleistungsabhängige) Betriebskosten von CC	14 EUR / 100 Fzg-km	BVWP 2030, Betriebskostengrundwerte
(fahrleistungsabhängige) Betriebskosten von SAV	14 EUR / 100 Fzg-km	auf Niveau der Betriebskosten für CC, ggf. höher durch z.B. Vandalismus, Säuberung (?)
(fahrleistungsunabhängige) Kosten pro CC	20 EUR / Tag	Kapitalkosten (~20k-40k EUR abgeschrieben über z.B. 5 Jahre) + ggf. Platzinanspruchnahme
(fahrleistungsunabhängige) Kosten pro SAV	20 EUR / Tag	auf Niveau der Kosten für CC (?)
Lärm von CC / SAV	63,3 EUR / Lärmbetroffenheitseinheit	~ Lärmberechnung nach RLS-90, Monetarisierung nach EWS (aktualisiert), Fzgtyp für > 30 km/h irrelevant
CO2 Emissionen von CC	0,02 EUR / Fzg-km	BVWP 2030, 2,6 g/l x ca. 0.06 l/km x 145 EUR/t = 0.023 EUR/km
CO2 Emissionen von SAV	0,00 EUR / Fzg-km	elektrisch betriebene SAV

SAV: Shared autonomous vehicle

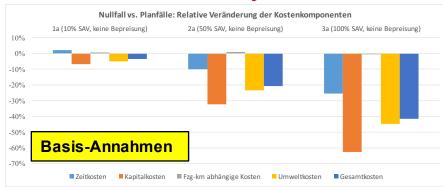
CC: Conventional driver-controlled private car

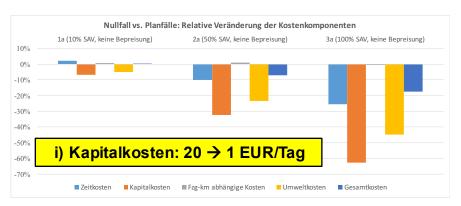
Gesamtwirtschaftliche Bewertung:



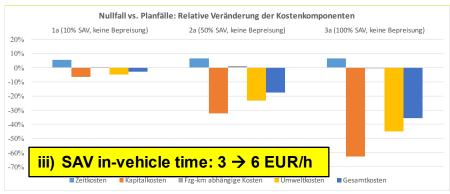
- Reduzierung der Gesamtkosten durch SAV, insbesondere bei großen Flottengrößen
- Betriebskostenänderungen eher gering (große Flottengröße, kurze Distanzen bei Leerfahrten)
- größte relative Änderung: Kapitalkosten

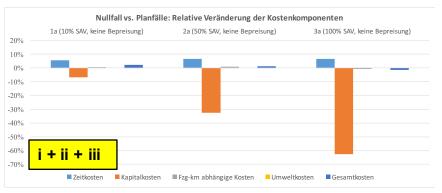
Sensitivitätsanalyse

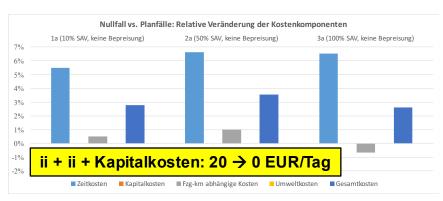




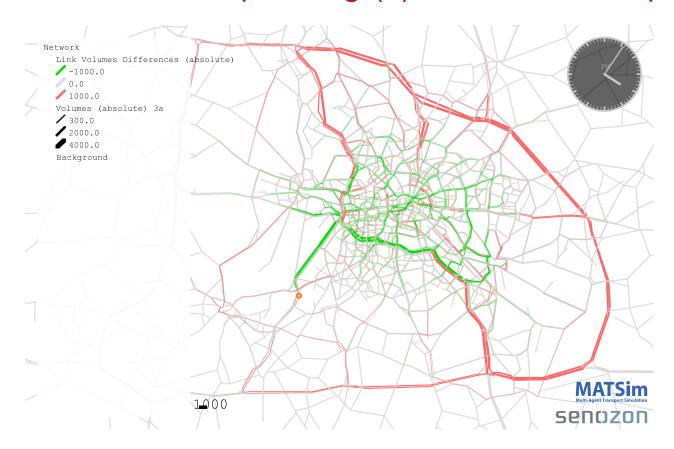








OHNE SAV-Bepreisung (a) vs. **MIT** SAV-Bepreisung (b)



- Mit SAV-Bepreisung: Zunahme der Fzg.-km (Umfahrung teurer Straßen in der Innenstadt): (1) +0,2%, (2) +2,9%, (3) +12,0%
- Reduzierung der Gesamtkosten primär aufgrund Veränderung von Zeitkosten, Umweltkosten haben eher geringeren Einfluss
- Mischbetrieb von SAV und CC (Planfall 1 und 2): CC profitieren von SAV-Bepreisung

Fazit und Ausblick

Simulationsgestützte Evaluation und Optimierung: geeignete Methodik zur ökonomischen Untersuchung von SAV

- → Bereitstellung relevanter **Kenngrößen**, z.B. Wartezeiten, Fahrzeiten, Umweltwirkungen, die u.a. für Sensitivitätsanalysen benötigt werde
- → Untersuchung des Potentials neuer Mobilitätskonzepte einschließlich der Steuerungsmöglichkeiten, z.B. über Preise, die den Nutzern ggf. auch weitergereicht werden können, alternativ: Sperrung bestimmter Straßen, Bezirke für SAV (bzw. SAV-Durchgangsverkehr), ...

Nächste Schritte...

- (weitere) Sensitivitäsanalysen, Hinzunahme weiterer Kostenkomponenten, z.B. Unfallkosten
- Optimierung der Flottengröße (Betreiberperspektive vs. Nutzerperspektive vs. gesellschaftliche Perspektive)
- Weitere Untersuchung auch kleinerer Flotten (→ mehr Leerfahrten, höhere Wartezeiten)
- Nutzung verbesserter "dispatch"-Strategien, von Pooling
- Untersuchung des durch SAV induzierten Verkehrs (mit vs. ohne Bepreisung)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Fragen, Kommentare, Hinweise?

kaddoura@vsp.tu-berlin.de

Ihab Kaddoura

Technische Universität Berlin Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik Salzufer 17-19, Sekr. SG 12, 10587 Berlin Tel.: +49 30 314 78 793

Fax.: +49 30 314 26 269 http://www.vsp.tu-berlin.de