

## Dekarbonisierung des urbanen Verkehrs

Kai Nagel, Ricardo Ewert, Joschka Bischoff, Michal Maciejewski, Alexander Grahle

*Die Dekarbonisierung des urbanen Verkehrs ist eine zentrale Herausforderung der Verkehrssysteme der Zukunft. In unserer Ausarbeitung erläutern wir, wie wir den nichtkommerziellen Personenverkehr, den Güterverkehr, den Personenwirtschaftsverkehr sowie einige Sonderverkehre modellieren, um anschließend bestimmte Maßnahmen zur Dekarbonisierung simulieren zu können. In diesem Zusammenhang verdeutlichen wir die Methodik, indem wir das Bei-*

*spiel der Modellierung der Hausmüllentsorgung am Beispiel Berlins genauer vorstellen. Dabei werden die genauen Folgen des Ersetzens der konventionellen Flotte mit Elektrosammelfahrzeugen beschrieben. Darauf aufbauend stellen wir weitere Ergebnisse und Einschätzungen zu unseren Forschungen in den Bereichen des Taxiverkehrs, des Pkw-Privatverkehrs sowie des öffentlichen Verkehrs vor.*

### Vorbemerkung und Einleitung

Roland Baar hat sich nachdrücklich für den Verbrennungsmotor eingesetzt [1]. Jedoch konzidiert auch er „Elektrofahrzeuge für bestimmte lokale Anwendungen“ [1]. Im DFG-geförderten Forschungsprojekt „Analyse von Strategien zur vollständigen Dekarbonisierung des urbanen Verkehrs“ [2] gehen wir unter anderem der Frage nach, wie groß die gesamtwirtschaftlichen Verluste wären, wenn das Verkehrssystem vollständig CO<sub>2</sub>-neutral betrieben werden müsste.

Wir betrachten dabei Produktion, Betrieb und Entsorgung der Fahrzeuge und gehen ansonsten im Sinne der wissenschaftlichen Arbeitsteilung davon aus, dass „benachbarte“ Sektoren wie z. B. Energieerzeugung oder Rohstoffgewinnung ihren eigenen Anteil leisten. Wir gehen für unsere Untersuchungen davon aus, dass CO<sub>2</sub>-neutrale Herstellung von Strom möglich ist und definieren zunächst ein unter dieser Bedingung aus unserer Sicht realisierbares CO<sub>2</sub>-freies Verkehrssystem. Unser derzeitiges Forschungsprojekt konzentriert sich auf den urbanen Verkehr. Unser Ansatz ist, dass wir zunächst konkrete, in der Nutzungsphase CO<sub>2</sub>-neutrale Technologien und Maßnahmen für den urbanen Verkehr postulieren, z. B. den Ersatz des individuellen Autoverkehrs durch eine taxiartige Flotte elektrischer Fahrzeuge. Mittels eines Simulationsmodells bestimmen wir die dadurch ausgelöst oder

erzwungenen Verhaltensänderungen und bewerten z.B. Fahrzeit- oder Wartezeitveränderungen analog zur Bewertungsmethodik im Bundesverkehrswegeplan als ökonomische Gewinne oder Verluste [3, S. 3 ff.]. Weiterhin betrachten wir Kosten und Umweltbilanz von Produktion und Entsorgung der Fahrzeuge.

Roland Baar kann unseren Beitrag leider nicht mehr kommentieren. Gern hätten wir seine Argumente gehört und darauf reagiert. Wir gehen aber davon aus, dass die Weiterführung der Diskussion – insbesondere, wenn sie auf Zahlen und quantitativen Modellen beruht – in seinem Sinne ist.

## Mikroskopische Simulation des urbanen Verkehrs

Schon seit vielen Jahren finden mikroskopische Simulationen des Verkehrs von Städten und Regionen weltweit Anwendung [4–8]. Mikroskopisch bedeutet dabei, dass jede Person, jedes Fahrzeug, jede Kreuzung etc. durch einen synthetischen Avatar in der Simulation repräsentiert wird. Insbesondere bei den Personen handelt es sich dabei um synthetisch erzeugte Objekte, die nur im statistischen Mittel die Gesamtbevölkerung widerspiegeln. Jede synthetische Person erhält mindestens einen aktivitätenbasierten Tagesplan, z.B. „zu Hause – Arbeiten – Einkaufen – Freizeit – zu Hause“. Jede Aktivität enthält einen Ort und eine Uhrzeit, zu der sie beendet wird<sup>1</sup>. Aktivitäten an unterschiedlichen Orten werden durch Wege verbunden, die mit einem Verkehrsmittel durchgeführt werden. In der von uns verwendeten Software MATSim (Multi-Agent Transport Simulation) [11] sieht eine synthetische Bevölkerung mit solchen Tagesplänen in etwa wie folgt aus:

```
<population>
  <person id="1">
    <plan>
      <act type="home" x="5.0" y="8.0" end_time="08:00" />
      <leg mode="car" />
      <act type="work" x="9.0" y="3.0" end_time="17:30" />
      <leg mode="car" />
      <act type="home" x="5.0" y="8.0" />
    </plan>
  </person>
  <person id="2">
    ...
  </person>
</population>
```

<sup>1</sup>Eine einfache Möglichkeit, solche Tagespläne zu erzeugen, besteht darin, sie aus Wegetagebüchern, wie in Deutschland z.B. den Mobilitätsstudien „System repräsentativer Verkehrsbefragungen“ (SrV) [9, S. 21] oder „Mobilität in Deutschland“ (MiD) [10, S. 76 f.], zu übernehmen. In den Wegetagebüchern sind aus Datenschutzgründen die exakten Ortsangaben normalerweise durch relativ grobe Zonen ersetzt. Es reicht oft, innerhalb der Zone einen Zufallspunkt zu wählen. Dabei wird die Zufälligkeit idealerweise durch die Flächennutzung (Strukturdaten) gewichtet.

Es lässt sich erkennen, dass die Person mit der  $id=1$  bis 8 Uhr zu Hause ist und dann mit dem Auto zur Arbeit fährt. Nach der Beendigung der Arbeit um 17:30 Uhr nutzt die Person wieder das Auto, um nach Hause zu fahren. Außerdem ist für jede Aktivität der Ort als x-y-Koordinate angegeben. Aus der Summe der einzelnen Pläne aller Personen ergibt sich dann die synthetische Bevölkerung. Im weiteren Verlauf der Simulation erzeugt MATSim die fehlenden Routen und startet dann einen iterativen Prozess, der aus folgenden Schritten besteht:

1. Jede synthetische Person hat einen „ausgewählten“ Plan (und ggf. noch weitere, siehe unten).
2. MobSim (Mobilitätssimulation): Eine Verkehrsfluss-Simulation oder „synthetische Realität“, die für jede synthetische Person den ausgewählten Plan ausführt. Daraus ergeben sich z. B. Verkehrsstaus oder überfüllte Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs.
3. Scoring: Alle synthetischen Personen bewerten den daraus entstehenden simulierten Tag. Diese Bewertung entspricht meist einer ökonomischen Nutzenfunktion und enthält positive Anteile für die Zeiten, in denen Aktivitäten durchgeführt werden und negative Anteile für die Zeiten, die im Verkehrssystem zugebracht werden. Falls es gewünscht ist, können z. B. die Effekte von Verkehrsstaus oder überfüllten Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs zusätzlich berücksichtigt werden.
4. Replanning: Allen synthetischen Personen wird die Möglichkeit gegeben, ihren ausgewählten Plan zu revidieren. Einige erzeugen daraufhin neue Pläne, die z. B. eine andere Route, ein anderes Verkehrsmittel, andere Abfahrtszeiten, andere Aktivitätenorte oder andere Aktivitätenreihenfolgen enthalten. Diese neu erzeugten Pläne werden dann „ausgewählt“ im Sinne von Punkt 1. Da sich die synthetischen Personen die vorher verwendeten Pläne merken, entstehen so für jede synthetische Person mehrere Pläne. Diejenigen Personen, die sich in einer Iteration keinen neuen Plan ausdenken, wählen einen gut bewerteten vorhandenen Plan, oft mit einem Logit-Modell [12].

Anschließend kehrt die Simulation zu Schritt 2 zurück. Die Iterationen werden beendet, wenn ein Großteil der synthetischen Bevölkerung nur noch selten bessere Alternativen entdeckt.

## Modellierung des gesamten urbanen Verkehrs

Unsere Methodik erzwingt es, dass wir für alle Fahrzeuge, die sich im urbanen Verkehrssystem bewegen, Modelle erstellen. Dafür unterscheiden wir folgende Segmente:

- Nichtkommerzieller Personenverkehr
- Güterverkehr
- Personenwirtschaftsverkehr
- Sonderverkehre

Die Aufteilung in diese Segmente wird wesentlich geprägt durch die in Deutschland vorhandenen Erhebungen. Im Folgenden werden unsere Ansätze für diese Segmente skizziert.

### *Nichtkommerzieller Personenverkehr*

Wie oben bereits erklärt, modellieren wir vollständige Tagespläne von Personen. Die Abgrenzung zum Personenwirtschaftsverkehr ergibt sich dabei aus der Spezifikation der Mobilitätsstudie „Mobilität in Deutschland“ (MiD) [10, S. 76]: „Für den Fall, dass Sie regelmäßig bestimmte Wege zurücklegen und dies auch an Ihrem Berichtstag getan haben (z. B. als Postbote, Taxifahrerin, Handwerker oder bei einer anderen Tätigkeit mit häufig wechselnden Orten): Tragen Sie bitte nur Ihre privaten Wege ein, z. B. den Weg zu Ihrer Arbeitsstätte und wieder nach Hause sowie weitere private Wege.“ Etwas unlogisch sind also unregelmäßige Dienstreisen Teil dieses Segmentes, regelmäßiger dienstlicher Verkehr hingegen nicht.

Für die Erzeugung synthetischer Tagespläne für den nichtkommerziellen Personenverkehr gibt es zahlreiche Modelle. Auch in unserer eigenen Forschung verwenden wir unterschiedliche Ansätze.

Die Methodik für unser offen verfügbares Berlin-Szenario [13] beruht auf den folgenden Schritten:

1. Erzeugung einer synthetischen Bevölkerung, also von synthetischen Personen mit demographischen Attributen wie Beschäftigungsstatus, Alter und Einkommen.
2. Für alle Personen, die beschäftigt sind, wird ein Arbeitsort festgelegt.
3. Für alle Personen, die in Ausbildung sind, wird ein Ausbildungsort festgelegt.
4. Für alle Personen werden alle weiteren Aktivitätentypen festgelegt. Es ergeben sich Aktivitätsketten, z. B. „zu Hause – Arbeiten – Einkaufen – Freizeit – zu Hause“.
5. Für die weiteren Aktivitätentypen werden in diesem Schritt Aktivitätenorte festgelegt.
6. Verkehrsmittel und Abfahrtszeiten werden kursorisch festgelegt, da sie ohnehin von der nachfolgenden iterativen Simulation adaptiert werden, siehe unten.

Am problematischsten gilt dabei Schritt 2. Zum einen sind hochauflösende Start-Ziel-Informationen aus Gründen des Datenschutzes problematisch<sup>2</sup>. Zum anderen werden in Deutschland kreisfreie Städte, also z. B. ganz Berlin, als eine Gemeinde behandelt, sodass z. B. aus der sogenannten Pendlerstatistik [14] innerhalb Berlins keine Binnenauflösung erhältlich ist. Mobilfunkdaten adressieren die zweite Herausforderung, nicht aber die erste, und führen stattdessen neue Probleme, wie die fehlende räumliche Auflösung, ein.

Um dieses Problem zu lösen, durchlaufen wir zunächst die Schritte 2 bis 5 mehrfach, sodass wir schlussendlich pro Person mehrere Tagespläne mit ganz unterschiedlichen Orten zur Verfügung haben. Mit diesen Plänen gehen wir dann in die iterative Simulation. Dort versuchen die synthetischen Personen, alle ihre Pläne durch Veränderung von Routen, Verkehrsmitteln und Abfahrzeiten zu verbessern. Außerdem vergleichen wir den simulierten Verkehr mit anonymen Verkehrszählungen und belohnen Pläne dort, wo wir im Modell weniger Verkehr vorfinden als in den realen Zählungen und bestrafen sie dort, wo wir im Modell mehr Verkehr vorfinden.

Am Ende dieser „Ortswahliterationen“ behalten wir für jede Person zunächst nur den am höchsten bewerteten Plan, welcher einen Kompromiss zwischen individuell maximiertem Nutzen und systemweiter Passgenauigkeit auf die Zähldaten darstellt. Diese Pläne werden dann in einem weiteren Simulationslauf nochmals weiter adaptiert. Dabei stehen nun die Sequenz und die Orte der Aktivitäten fest und ausschließlich die Routen, Zeiten und Verkehrsmittel werden angepasst. In diesen jetzt stattfindenden Iterationen des Bezugsfalls werden die individuellen Nutzenfunktionen so verändert, dass insbesondere die Verkehrsmittelwahl möglichst gut mit der Realität übereinstimmt. Verkehrliche Maßnahmen werden schlussendlich simuliert, indem die Iterationen des Bezugsfalls nach Programmierung der Veränderung neu durchgeführt werden.

### *Güterverkehr*

Güterverkehr simulieren wir analog zum Personenverkehr, indem wir den Weg der Güter nachvollziehen und dafür entsprechende Modelle aufbauen. Beispielsweise ist für Lebensmitteltransporte bekannt, dass die unterschiedlichen Supermarktketten außerhalb von Berlin Depots haben und von dort ihre Filialen anliefern. Wenn deren wöchentlichen Bedarfe bekannt sind (z. B. aus den Bedarfen der umliegenden Bevölkerung), dann kann man diese in tägliche Bestellungen umrechnen

---

<sup>2</sup>Als Faustregel im Datenschutz gilt, dass jede Kategorie mindestens sieben Personen enthalten muss. Wenn sich also z. B. 1000 Beschäftigte einer Ausgangsgemeinde zum Arbeiten auf 100 Zielgemeinden verteilen, so ist es recht wahrscheinlich, dass in einem Teil dieser Zielgemeinden weniger als sieben Personen aus der Ausgangsgemeinde arbeiten. Die Anzahl der Fahrten in diese „dünn besetzten“ Zielgemeinden wird dann nicht mehr berichtet. Typischerweise handelt es sich hierbei aber gerade um die verkehrlich besonders relevanten langen Wege.

und für diese dann per Tourenplanung konkrete Auslieferungstouren erstellen. Wegen Arbeitszeitbeschränkungen der Fahrer\*innen sowie Volumen- und Gewichtsbeschränkungen der Fahrzeuge ergeben sich daraus sowohl die Fahrzeugzahl als auch deren konkrete Routen.

Eine Elektrifizierung dieses Segments kann durchgerechnet werden, indem die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge durch elektrische Fahrzeuge mit anderen Zuladungen und Reichweiten ersetzt werden. Ein Beispiel dieses Vorgehens wird unten am Beispiel der Hausmüllentsorgung genauer vorgestellt.

### *Personenwirtschaftsverkehr*

Typische Modelle für den Personenwirtschaftsverkehr sind ähnlich strukturiert wie für den Güterverkehr. Beispielsweise werden mithilfe der demographischen Daten in der synthetischen Bevölkerung die individuellen Pflegebedarfe modelliert. Anschließend wird diese Nachfrage den Pflegediensten zugeordnet, deren Personal dementsprechend zu seinen Einsatzorten fährt. Relativ offensichtlich hat man auch hier pro Pflegedienst eine Flotte von Fahrzeugen, die an einem gegebenen Tag alle Bedarfe befriedigen muss. Dies kann man als Tourenplanungsproblem definieren und lösen.

Analog zum Güterverkehr kann man die fossilen durch elektrische oder nicht motorisierte Fahrzeuge ersetzen und Reaktionen des Systems betrachten. Wir haben mit diesem Teil des Projektes noch nicht begonnen und können daher nichts Spezifisches berichten.

### *Sonderverkehre*

Sonderverkehre sind alle Verkehre, die durch die obigen Kategorien nicht erfasst sind. Hierzu gehören z. B. Müllabfuhr, Kehrmaschinen und Feuerwehr/Polizei/Notarzt. Für regelmäßige Sonderverkehre sind die Modelle ähnlich wie im Güterverkehr. So müssen Müllabfuhr oder Kehrmaschinen an einem gegebenen Tag bestimmte Straßen bedienen und dafür müssen Touren festgelegt werden. Das Segment der Müllentsorgung wird im nächsten Abschnitt genauer betrachtet.

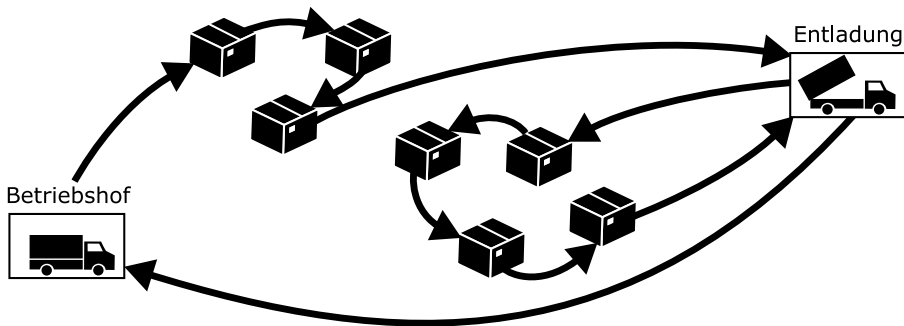
## **Illustration der Methodik am Beispiel der Modellierung der Hausmüllentsorgung**

Der folgende Abschnitt beruht auf [15]. Dort finden sich ggf. weitere Details.

### *Modellierung der Touren*

Ein Entsorgungsfahrzeug beginnt morgens am Depot und fährt dann Abholorte an, bis die Kapazität des Fahrzeuges erschöpft ist. Anschließend fährt das Fahrzeug

zur Entladestation und wechselt dann so lange zwischen Abholorten und Entladestation, bis die zur Verfügung stehende Zeit aufgebraucht ist (Abbildung 1). Die letzte Fahrt geht von der Entladestation zum Depot zurück. Die Fahrzeugdepots und Entladestationen sind in Berlin getrennt und in Abbildung 2 dargestellt.

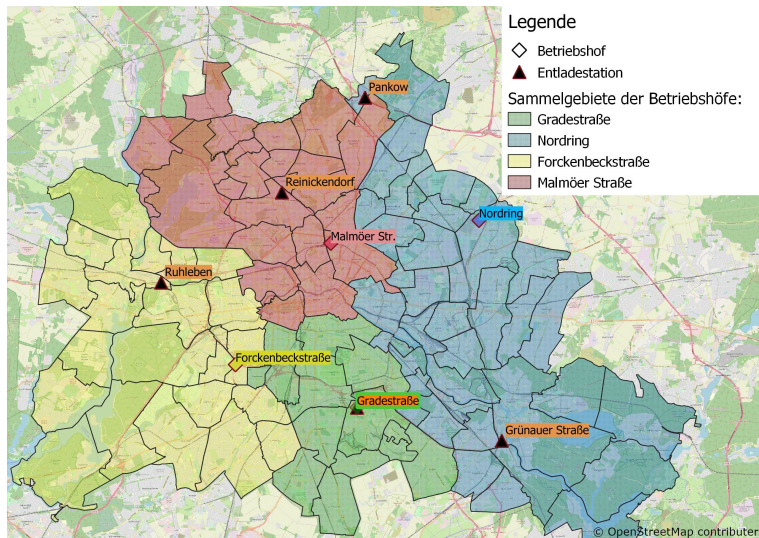


**Abbildung 1:** Eine typische Tour eines Entsorgungsfahrzeuges: Fahrzeugdepot (=Betriebshof) → Abholungen → Entladung → Abholungen → Entladung → Depot

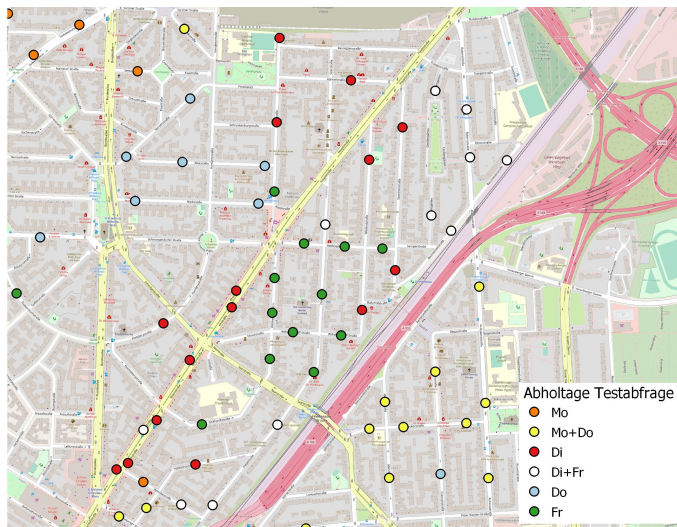
Um einen synthetischen Abfallkalender zu erstellen, wurde zunächst der reale Abfallkalender betrachtet. Hier konnte kein Muster festgestellt werden (Abbildung 3).

Es wurde daher ein synthetischer Abfallkalender aus folgenden Prinzipien und Überlegungen hergeleitet:

1. Es wird das Entsorgungssegment mit der größten Menge betrachtet. Dies ist derzeit der Hausmüll.
2. An einem gegebenen Tag wird ein Ortsteil komplett oder gar nicht angefahren.
3. Abholtage sind zunächst Montag und Donnerstag bzw. Dienstag und Freitag für dicht besiedelte Gebiete, sowie Mittwoch für dünner besiedelte Gebiete. Anschließend werden die Tage für Ortsteile manuell so angepasst, dass eine gleichmäßige Auslastung über die Abholtage entsteht. Die Abfallmengen ergeben sich dabei anteilig aus den dazwischenliegenden Tagen.
4. Jeder Ortsteil entsorgt in eine nahegelegene Entladestation (vgl. Abbildung 3). Die Zuordnungen werden manuell so angepasst, dass die Empfangsmenge der Entladestationen ungefähr den aus den Daten bekannten Mengen entspricht.



**Abbildung 2:** Fahrzeugdepots sowie die zugeordneten Ortsteile; Entsorgungsstationen. Kartenmaterial von Open Street Maps [16] mit eigenen Ergänzungen



**Abbildung 3:** Visualisierung des Abfallkalenders der BSR in Berlin. Kartenmaterial von Open Street Maps [16] mit eigenen Ergänzungen unter Nutzung der Daten der BSR sowie der Software QGIS



Der hieraus hergeleitete synthetische Abfallkalender kennt nun für jeden Ortsteil die Zuordnung zu einem Betriebshof, die Abholtag und für jeden Abholtag die zugeordnete Entladestation. Die Abfallmengen eines Ortsteils werden proportional zur Gesamtlänge der Straßen auf die Straßen verteilt, wobei Straßen mit einer hohen Maximalgeschwindigkeit ausgeschlossen werden, um keine Sammlungen an Autobahnen zu generieren.

Nun kann man für jeden Abholtag und jeden Betriebshof separat ein Tourenplanungsproblem lösen, genauer gesagt ein pick-up-and-delivery-Problem, weil die Abfälle von den Abholstellen zu den Entladestationen gebracht werden müssen. Dabei ist stets die Einhaltung der Zuladungsbeschränkungen der Fahrzeuge sowie der Gesamtarbeitszeit zu beachten. Zur Lösung des Problems wird die Tourenplanungssoftware jsprit [17] verwendet.

Als Resultat der Tourenplanung ergeben sich Touren wie in Abbildung 4 (und schematisch in Abbildung 3 dargestellt): Zunächst fährt das Fahrzeug einen längeren Weg vom Depot zum Abholgebiet. Dort fährt es dann kleinteilig alle individuellen Straßen ab. Wenn die Kapazität erschöpft ist, macht es eine längere Fahrt zur Entsorgungsanlage. Dieser Zyklus wiederholt sich, bis am Ende des Tages eine Fahrt von der Entsorgungsanlage zurück ins Depot stattfindet.



**Abbildung 4:** Eine synthetisch erzeugte Trajektorie eines Fahrzeugs. Kartenmaterial von Open Street Maps [16] mit eigenen Ergänzungen unter Nutzung eigener Daten sowie der Software VIA

### *Festlegung von Fahrzeugtypen*

Um valide Aussagen über die Elektrifizierung des Entsorgungsverkehrs und die daraus resultierenden ökologischen und ökonomischen Implikationen treffen zu können, spielen die angenommenen Fahrzeugparameter eine entscheidende Rolle.

Um das volle Potential heutiger Verbrennungsmotoren aufzuzeigen, wird ein dieselbetriebenes Abfallsammelfahrzeug mit Euro-6-Emissionsstandard als Referenz ausgewählt, dessen Konfiguration wir aus Gesprächen mit einem großen deutschen Abfallsammelunternehmen erhalten haben. Die Auswahl eines batterieelektrischen Pendants erweist sich als deutlich komplizierter, da die Entwicklung und Markteinführung schwerer e-Lkw noch deutlich hinter elektrischen Pkw zurückbleibt. Gleiches gilt für kommunale Nutzfahrzeuge. Konkret heißt das, dass Stand 2019 lediglich Prototypen und einige wenige Kleinstserien elektrischer Abfallsammelfahrzeuge existieren [18]. Um dieser Situation gerecht zu werden, haben wir uns für das Modell EF26 KSF des Schweizer Herstellers E-Force entschieden, welches zwar in sehr geringen Stückzahlen produziert wird, aber käuflich erworben werden kann. Der entscheidende Faktor bei elektrischen (Nutz-)Fahrzeugen ist die Batterie. Sie ist maßgeblicher Kostentreiber, hat aufgrund ihres hohen spezifischen Gewichts Einfluss auf die mögliche Nutzlast und bedingt die mögliche Reichweite des Fahrzeugs. Das ausgewählte Abfallsammelfahrzeug kann mit unterschiedlich großen Batterien ausgestattet werden. Exemplarisch werden zwei Versionen ausgewählt: Eine große Batterie mit Auswirkungen auf die Nutzlast und eine kleine Batterie, welche bei reduzierter möglicher Reichweite die gleiche Nutzlast wie das konventionelle Fahrzeug erlaubt. Es muss angemerkt werden, dass die betrachteten Elektrofahrzeuge vom Hersteller mit 26 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht angegeben werden, was wir daher auch so übernehmen. Laut EU-Richtlinie 2015/719 dürfen jedoch batterieelektrische dreiachsige Lkw bis zu einer Tonne schwerer sein als vergleichbare konventionelle Fahrzeuge [19, S. 9]. Das bedeutet, dass in Zukunft auch Fahrzeuge mit größerer Batterie und dennoch identischer Nutzlast realisierbar sein werden. Die hier getroffenen Annahmen können somit als Worst-Case angesehen werden.

Die Daten beider Fahrzeuge befinden sich in Tabelle 1. Um die Zuverlässigkeit der vom Hersteller angegebenen Parameter zu beurteilen, werden der spezifische Batteriepreis, die möglichen Ladezyklen und der Energieverbrauch folgend kurz diskutiert. Davon ausgehend, dass 80 % der installierten Batteriekapazität tatsächlich genutzt werden (Nettokapazität wird angegeben), errechnet sich für das Beispielfahrzeug ein spezifischer Preis von 604 €/kWh für die große und 650 €/kWh für die kleine Batterie. Diese Werte sind verglichen mit aktuellen Quellen eher hoch [20, S. 20; 21]. Dies ist möglicherweise den kleinen Stückzahlen geschuldet, repräsentiert jedoch den aktuellen Markt. Die angegebenen 4000 Vollzyklen erscheinen zunächst optimistisch. Jedoch ist die ausgewählte NMC-Batterie flüssigkeitstemperiert, was nach aktuellen Erkenntnissen sogar deutlich mehr als 4000 äquivalente Vollzyklen zulässt [22]. Somit ist auch diese Herstellerangabe plausibel.

Für den realen Verbrauch von elektrischen Abfallsammelfahrzeugen im urbanen Einsatz existieren keine uns bekannten Daten. Der mittlere, vom Hersteller angegebene Bereich für den Fahrverbrauch ( $1 \text{ kWh/km}$ ) deckt sich etwa mit Angaben für

urbane Stadtbusse, welche ähnliche Gesamtgewichte und vergleichbare Fahrprofile (Stop and Go zwischen Haltestellen bzw. Abholadressen) aufweisen [23].

**Tabelle 1:** Fahrzeugtypen

	<b>Fossil</b>	<b>BEV1</b> (gr. Batterie)	<b>BEV2</b> (kl. Batterie)
<b>Zulässiges Gesamtgewicht</b>	26 000 kg	26 000 kg	26 000 kg
<b>Nutzlast</b>	11 500 kg	10 500 kg	11 500 kg
<b>Ladevolumen</b>	22 m <sup>3</sup>	22 m <sup>3</sup>	22 m <sup>3</sup>
<b>Kombinierter Verbrauch</b>	73 l/100 km	-	-
<b>Verbrauch Fahren</b>	60 l/100 km	100 kW h/100 km	
<b>Verbrauch Sammeln</b>	0,5 l/1000 kg	1,4 kW h/1000 kg	
<b>Kaufpreis Fahrzeug</b>	210 000 €	452 250 € (ohne Batterie)	
<b>Batteriekosten</b>	-	234 000 €	126 000 €
<b>Nutzbare Batteriekapazität</b>	-	310 kW h	155 kW h
<b>Batteriegewicht</b>	-	2 940 kg	1 470 kg
<b>Äq. Vollzyklen bis 80 % SoH<sup>3</sup></b>	-	4 000	4 000
<b>Zellchemie</b>	-	LiNi <sub>x</sub> Mn <sub>y</sub> Co <sub>z</sub> O <sub>2</sub> (NMC)	

## Resultate

Die Resultate der Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Keine der synthetisch ermittelten Touren ist länger als 114 km und benötigt mehr als 142 kW h.
- Dies ist bereits mit der kleinen Batterie realisierbar. Die Länge der Touren liegt also deutlich unterhalb dessen, was bereits heute ohne Nachladen möglich ist. Die Notwendigkeit des Nachladens unterwegs entfällt also. Dies erspart die dafür ansonsten nötigen Schnellladestationen und erlaubt das Aufladen über Nacht. Das verringert den Preis der Ladeinfrastruktur und erhöht die Lebensdauer der Batterien.
- In zehn angenommenen Betriebsjahren der Fahrzeuge ist somit kein Batteriewechsel erforderlich.

<sup>3</sup>State of Health, also Intaktheitsgrad der Batterien

- Im Prinzip reduzieren Batterien durch ihr Gewicht die mögliche Zuladung, würden also häufigere Fahrten zur Entsorgungsstation nötig machen. Bei der Auslegung der Batterien auf 155 kW h ist allerdings die Zuladung genauso hoch wie bei konventionellen Fahrzeugen. Es könnten also die gleichen Touren wie mit konventionellen Fahrzeugen gefahren werden.

Diese Resultate vereinfachen das Problem signifikant: Da nur das Fahrzeug ausgetauscht werden muss und der Betriebsablauf so bleiben könnte wie bisher, müssen auch nur die Kostenänderungen durch den ausgetauschten Fahrzeugtyp und die veränderten Energiekosten berücksichtigt werden. Um die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Umstellung zu quantifizieren, werden auf Basis der Simulationsergebnisse eine Total-Cost-of-Ownership-Analyse und eine Well-to-Wheel-Analyse jeweils für eine konventionelle und eine elektrifizierte Flotte durchgeführt. Diese führen zu folgenden Resultaten:

- Unter der Annahme, dass Personalkosten sowie Wartungs- und Flottenmanagementkosten zwischen konventionellen und elektrifizierten Szenario gleichbleiben, ergibt die Elektrifizierung im ungünstigsten berechneten Fall einen Anstieg der Betriebskosten um 17 %.
- Es fällt ins Auge, dass die Personal- und Instandhaltungskosten mit mehr als 83 % im konventionellen und mehr als 71 % im elektrifizierten Szenario den überwiegenden Anteil der Kosten verursachen.
- Ein Teil der gestiegenen Beschaffungskosten für die mehr als doppelt so teuren elektrischen Abfallsammelfahrzeuge wird durch deutlich geringere Energiekosten ausgeglichen.
- Eine Well-to-Wheel-Analyse mit der Datenbank Ecoinvent v3.5 ergibt bereits für den aktuellen Deutschen Strommix eine Reduktion der äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Nutzungsphase um 71 %.
- Für das theoretische Szenario einer vollständig regenerativen Stromerzeugung steigt dieser Wert wie zu erwarten auf annähernd 100 % (geringe Emissionen verbleiben aufgrund der Anlagen zur Stromerzeugung und Distributions-Infrastruktur). Das bedeutet, dass der Ausstoß von CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen in der Nutzungsphase nahezu vollständig vermieden wird.
- Durch die Elektrifizierung der Hausmüllentsorgung würde unabhängig vom Strommix der lokale Ausstoß gesundheitsschädlicher Emissionen wie Stickoxide, Ruß, Kohlenmonoxid und unverbrannter Kohlenwasserstoffe vermieden. Da Kommunalfahrzeuge trotz ihrer verhältnismäßig geringen Anzahl einen erheblichen Anteil dieser Emissionen verursachen, hätte deren Wegfall bereits signifikante Auswirkungen auf die Luftqualität in der Stadt [24].

Für die genaue Herleitung dieser Resultate siehe [15]. Wir finden mehrere Aspekte dieser Ergebnisse überraschend. Zum einen hätten wir nicht erwartet, dass die Batteriekapazitäten bereits heute mehr als ausreichen, insbesondere vor dem Hintergrund, dass es noch nicht einmal nötig ist, während des Tages nachzuladen. Zum anderen stellen wir fest, dass es nicht die Technologiekosten, sondern die Personalkosten sind, die die Kostenrechnung dominieren. Vor diesem Hintergrund führen selbst die mehr als verdoppelten Investitionskosten immer noch zu „beherrschbaren“ Erhöhungen der Gesamtkosten.

Wir würden also, bei „erzwungener“ Elektrifizierung der (Haus-)Müllentsorgung in Berlin eine Erhöhung der Müllgebühren um weniger als 20 % vorhersagen. Eine Zwei-Zimmer-Wohnung in Berlin zahlt derzeit ca. 10 €/Monat<sup>4</sup> für die Müllentsorgung; diese würden also um 2 €/Monat steigen. Damit handelt es sich um ein Problem, welches auf technischem Wege zu vertretbaren Kosten lösbar scheint.

## Weitere Segmente des Verkehrs

Neben der Müllentsorgung haben wir für weitere Verkehrssegmente, wie dem Taxiverkehr, dem Pkw-Privatverkehr und dem öffentlichen Verkehr vergleichbare Untersuchungen durchgeführt. Diese Ergebnisse stellen wir in dem folgenden Abschnitt dar.

### *Taxiverkehr*

Auf ähnliche Ergebnisse waren wir bei der Analyse einer möglichen Elektrifizierung des Berliner Taxiverkehrs gestoßen [26]. Unsere Überraschung darüber war ein wichtiger Auslöser des jetzigen Projekts. Hier stellte sich heraus, dass ein elektrischer Betrieb – sogar einschließlich Bau- und Betriebskosten von Ladestationen – insgesamt eher preiswerter sein würde als der bisherige fossile Betrieb. Ein wichtiges Element dieser Betrachtung war die Einsicht, dass Taxifahrzeuge eine so hohe Laufleistung aufweisen, dass ein Wechsel der Batterie erforderlich wird. Damit werden die normalerweise sehr hohen fixen Kosten der Batterie variabilisiert, also auf die gefahrenen Kilometer umgelegt. Die Kosten pro Kilometer gehen dadurch hoch, bleiben aber immer noch niedriger als die Kosten bei fossil angetriebenen Fahrzeugen. Ein verbleibendes Problem waren die sehr kalten Wintertage. An diesen ist doppelt so viel Strom wie sonst nötig, um den Innenraum der Fahrzeuge zu heizen. Gleichzeitig wird der Ladestrom kältebedingt halbiert. Es lohnt sich aber nicht, für diese wenigen Tage die entsprechende Ladeinfrastruktur vorzuhalten. Unsere kurzfristige Empfehlung wäre der Einbau von kraftstoffbetriebenen

---

<sup>4</sup>Berechnung anhand des jährlichen Verbrauchs einer Person von ca. 217 kg/Jahr [15] und der Kostenkalkulation der BSR [25]

Standheizungen. Diesen Weg geht auch die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) mit ihren elektrischen Bussen [27]. Mittelfristig wird es verbesserte technische Lösungen geben wie z. B. Wärmepumpen statt elektrischer Heizdrähte oder eine bessere Fahrzeugisolierung.

### *Pkw-Privatverkehr*

Aus dieser Einsicht für den Taxiverkehr folgte als nächstes der Versuch, den gesamten Berliner Autoverkehr durch eine Flotte fahrerloser und elektrischer Robotaxis zu ersetzen. Die zentralen Resultate der Simulationen [28] waren:

- Mit 100 000 Fahrzeugen, dies entspricht einem Zehntel der derzeitigen privaten Flotte, könnten alle Anfragen ohne über die reine Anfahrt hinausgehende Wartezeit bedient werden. Dies führt in Außenbezirken immer noch zu Wartezeiten von mehr als 15 Minuten; wir gehen aber davon aus, dass dies durch vorausschauende Algorithmen verringert werden könnte.
- Wenn die Robotaxis im Einzelpassagierbetrieb fahren, dann erzeugt das System zwischen 10 % und 15 % mehr Fahrzeugkilometer wegen der Leerfahrten von einem Drop-off zum darauffolgenden Pick-up. Dies muss kompensiert werden, z. B. durch besseren Verkehrsfluss bei fahrerlosen Fahrzeugen oder die Integration von Pooling, also Fahrten mit mehreren Fahrgästen pro Fahrzeug. Letzteres ist allerdings algorithmisch erheblich langsamer, weshalb wir dort noch keine endgültigen Resultate haben.
- Es verbleibt genügend Zeit, in der die Fahrzeuge auf Passagiere warten und die somit problemlos zum Nachladen genutzt werden kann.

Fahrerloses Fahren ist selbstverständlich noch keine etablierte Technologie und für den urbanen Raum vor 2030 nicht zu erwarten. Es sind jedoch auch andere Lösungen denkbar, z. B. ein sehr vorsichtiges Fahren der Fahrzeuge zu den Fahrgästen; die Fahrgäste fahren selbst mit normaler Geschwindigkeit zum Ziel; das Fahrzeug sucht sich im vorsichtigen fahrerlosen Modus einen Abstellplatz oder eine Ladestelle. Alternativ könnten in Städten in Schwellenländern, in denen die Fahrerlöhne derzeit sehr niedrig sind, der Privatverkehr durch elektrifizierte Taxis mit Fahrern ersetzt werden, deren Routen über eine App optimiert werden. Sowohl Umweltprobleme als auch CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ließen sich dadurch deutlich reduzieren.

Bezüglich der Kosten wäre ein fahrerloses System etwa so teuer wie das derzeitige mit privaten Pkw. Es wären zwar nur noch ein Zehntel der heutigen Fahrzeuge unterwegs, aber diese hätten mehr als zehn Mal so viel Laufleistung wie die heutigen privaten Fahrzeuge. Weiterhin ist unklar, wieviel zusätzliche Kosten die Automatisierung verursacht, sowohl technisch als auch bzgl. des Nutzerverhaltens, z. B. Innenraumverschmutzung. Wir gehen davon aus, dass sich beides in etwa die

Waage halten würde. Über die Variabilisierung der Batteriekosten haben wir bei den elektrischen Taxis schon berichtet; dies würde auch hier gelten.

Eine Alternative wären vollständig elektrische Privat-Pkw. Dies ist tatsächlich schwieriger zu berechnen als die Versorgung durch eine Flotte, weil Lösungen für die verschiedenen Ladeszenarien gefunden werden müssen: Während dies für Personen mit Einfamilienhaus problemlos lösbar ist, muss man für die sogenannten „Laternenparker“ entweder alle öffentlichen Parkplätze ausstatten oder davon ausgehen, dass sie z. B. an ihren Arbeitsplätzen laden können. Es ist zu vermuten, dass dies eher zu einer Überausstattung mit Ladeinfrastruktur und somit zu höheren Gesamtkosten führen würde. Unsere diesbezüglichen Rechnungen sind noch nicht abgeschlossen.

Die Resultate in diesem und damit vermutlich auch in anderen Verkehrssegmenten sind derzeit nicht räumlich transferierbar. Simulationen von Kollegen für die Mittelstadt Rouen in Frankreich [29] ergeben deutlich längere Fahrten als unsere für Berlin und insbesondere deutlich längere Tageslaufleistungen von mehr als 600 km verglichen mit unseren ca. 250 km. Da die elektrischen Reichweiten „bezahlbarer“ Fahrzeuge eher bei 200 km liegen, gibt es in der Simulation in Rouen deutlich andere Notwendigkeiten des Nachladens. Daraus muss man mitnehmen, dass wir derzeit keine übertragbaren Antworten haben, sondern jedes Szenario für jeden Ortstyp individuell durchgerechnet werden muss. Wir haben z. B. auch Projekte für Gladbeck (im Ruhrgebiet) und die Vulkaneifel (dünnbesiedelter ländlicher Raum) und werden berichten.

### *Öffentlicher Verkehr*

Der öffentliche Verkehr fährt in Berlin bereits elektrisch (U-Bahnen, Straßenbahnen) oder befindet sich im elektrischen Probebetrieb (Busse). Die Elektrifizierung von Bussen ist technisch bereits auf einem sehr hohen Stand und wird international in vielen Städten erprobt [30, S. 4]. Insbesondere bei kurzen Zubringer-Linien oder Linien, die nur wenige Stunden am Stück betrieben werden, erweist sich der Technologiewechsel als vergleichsweise einfach. Hier kann über Nacht im Depot mit eher geringer Ladeleistung geladen werden. Die Vorgehensweise ist vergleichbar mit dem von uns vorgestellten Ansatz für die Elektrifizierung der Müllabfuhr. Die Elektrifizierung von Linien mit langen Umläufen und langer Betriebszeit scheint dagegen schwieriger zu sein als alles, was in diesem Text bisher betrachtet wurde: So reicht bei diesen die nächtliche Ladung nicht für den nachfolgenden Tag, und es gibt auch keine längeren Zwischenzeiten, bei denen das Fahrzeug nicht benötigt und somit mit moderater Ladeleistung nachgeladen werden kann. Dies führt zur Investition in sehr teure Schnellladestationen an den Wendepunkten, ermöglicht jedoch auch kleinere Batterien in den Fahrzeugen und damit geringere Anschaffungskosten. Es ist daher keine pauschale Aussage möglich, welche Technologie

teurer ist [31]. Diese „Gelegenheitsladen“ genannte Strategie wird aktuell im Kooperationsprojekt „E-Metrobus“ von der BVG, dem Reiner Lemoine Institut und der TU Berlin für eine hochbelastete Linie in Berlin erforscht.

## Diskussion und Zusammenfassung

Dieser Beitrag behandelt mögliche Szenarien zur Dekarbonisierung des urbanen Verkehrs. Es geht dabei explizit nicht um Übergänge, sondern um die Frage, wie das System aussehen könnte, wenn man „einen Schalter umlegen“ könnte. Daher orientieren wir uns z. B. auch nicht am heutigen Strommix, sondern gehen davon aus, dass Strom vollständig nachhaltig und ohne CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei gleichbleibenden Kosten erzeugt werden kann. Auch halten wir Elektrifizierung nicht für die einzig mögliche Technologie. Wir konzentrieren uns auf Elektrifizierung, weil wir hier entsprechende technische Spezifikationen – Fahrzeuge, Ladestationen, Preise, Reichweiten – gefunden haben. Es geht also darum, eine „untere Schranke“ für die Nutzenabnahmen und Kostenzunahmen zu finden – wenn sich dann bessere Alternativen finden, können sie ja nur darüber liegen. Andererseits kann man auch argumentieren, dass Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe zunächst in den Bereichen benötigt werden, die sich nicht elektrisch betreiben lassen – Flugzeuge, Schiffe, bestimmte Hochtemperatur-Prozesse. Dies würde den urbanen Verkehr in eine Elektrifizierung zwingen, weil das dann die einzige verbleibende CO<sub>2</sub>-freie Technologie wäre.

Weiterhin behandelt der obige Text nur Teile des Verkehrssystems: die Müllentsorgung sowie den nichtkommerziellen Personenverkehr. Bei der Müllentsorgung in Berlin ergibt sich selbst nach heutigem Technologie- und Kostenstand nur eine ca. 20-prozentige Erhöhung der Müllgebühren. Die politische Diskussion wird klären müssen, ob das zumutbar ist. Beim motorisierten Individualverkehr hängt viel davon ab, ab wann Fahrzeuge fahrerlos fahren können, wenigstens im Vor- und Nachlauf des Fahrgastbetriebs. U-Bahnen und Straßenbahnen fahren bereits elektrisch. Bei den Bussen wurde ein elektrischer Probebetrieb aufgenommen. Deren Elektrifizierung ist aufgrund ihrer typischen Einsatzcharakteristik und entsprechend notwendiger Ladeinfrastruktur schwieriger als alles, was in diesem Text behandelt wurde. Beim Taxiverkehr in Berlin hingegen sind wir der Meinung, dass man sofort verlangen könnte, dass Neufahrzeuge elektrisch sein müssen, und gleichzeitig eine entsprechende Ladeinfrastruktur an den Taxisständen aufgebaut werden sollte. Weitere Segmente werden wir zukünftig behandeln und dann auch zu einem Gesamtbild kommen.



## Literatur

- [1] BAAR, R.: „Nur noch Emissionsfreie Autos ab 2030. Vision und Wirklichkeit“. In: *TUB-newsportal* (2016). URL: [https://www.pressestelle.tu-berlin.de/menue/tub\\_medien/newsportal/forschungs\\_news/2016/nur\\_noch\\_emissionsfreie\\_autos\\_ab\\_2030\\_vision\\_und\\_wirklichkeit/](https://www.pressestelle.tu-berlin.de/menue/tub_medien/newsportal/forschungs_news/2016/nur_noch_emissionsfreie_autos_ab_2030_vision_und_wirklichkeit/) (besucht am 16.06.2020).
- [2] FACHGEBIET FÜR VERKEHRSSYSTEMPLANUNG UND VERKEHRSTELEMATIK, Hrsg.: *Analyse von Strategien zur vollständigen Dekarbonisierung des urbanen Verkehrs – zeroCUTS*. 2020. URL: [https://www.vsp.tu-berlin.de/menue/forschung/projects/2018/dekarbonisierung\\_des\\_urbanen\\_verkehrs\\_zerocuts/](https://www.vsp.tu-berlin.de/menue/forschung/projects/2018/dekarbonisierung_des_urbanen_verkehrs_zerocuts/) (besucht am 16.06.2020).
- [3] RIEKEN, P.; TROSKY, F.; GOLDMANN, K.; MANN, H.-U.; POHL, M.; NAGEL, K.; BECKERS, T.; LIEDTKE, G.; WINTER, M.; B. KICKHÖFER, und: *Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung*. Hrsg. von BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. 2015. URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/BVWP/bvwp-2015-ueberpruefung-nka-endbericht.html> (besucht am 16.06.2020).
- [4] MAHMASSANI, H.; JAYAKRISHNAN, R.; HERMAN, R.: „Network traffic flow theory: Microscopic simulation experiments on supercomputers“. In: *Transportation Research Part A: General* 24 (2 1990), S. 149–162. DOI: 10.1016/0191-2607(90)90022-X.
- [5] NAGEL, K.; SCHLEICHER, A.: „Microscopic traffic modeling on parallel high performance computers“. In: *Parallel Computing* 20 (1 1994), S. 125–146. DOI: 10.1016/0167-8191(94)90117-1.
- [6] ESSER, J.; SCHRECKENBERG, M.: „Microscopic Simulation of Urban Traffic Based on Cellular Automata“. In: *International Journal of Modern Physics C* 8 (5 1997), S. 1025–1036. DOI: 10.1142/S0129183197000904.
- [7] RANEY, B.; VOELLMY, A.; CETIN, N.; VRTIC, M.; NAGEL, K.: „Towards a Microscopic Traffic Simulation of All of Switzerland“. In: *Computational Science – ICCS 2002* 2329 (2002), S. 371–380. DOI: 10.1007/3-540-46043-8\_37.
- [8] MILLER, E. J.; HUNT, J. D.; ABRAHAM, J. E.; SALVINI, P. A.: „Microsimulating urban systems“. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 28 (1–2 2004), S. 9–44. DOI: 10.1016/S0198-9715(02)00044-3.
- [9] AHRENS, G. A.; LIESSKE, F.; WITTWER, R.; HUBRICH, S.; WITTING, S.: *Methodenbericht zum Forschungsprojekt, Mobilität in Städten – SrV 2013*. 2014. URL: <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/srv-2013> (besucht am 16.06.2020).
- [10] EGGS, J.; FOLLMER, R.; GRUSCHWITZ, D.; NOBIS, C.; BÄUMER, M.; PFEIFFER, M.: *Mobilität in Deutschland – MiD. Anhang zum Methodenbericht*. Hrsg. von BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. 2018. URL: [www.mobilitaet-in-deutschland.de](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de) (besucht am 16.06.2020).
- [11] HORNI, A.; NAGEL, K.; AXHAUSEN, K., Hrsg.: *Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London: Ubiquity Press, Aug. 2016. ISBN: 978-1-909188-78-5. DOI: 10.5334/baw.
- [12] BEN-AKIVA, M. E.; LERMAN, S. R., Hrsg.: *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. London: MIT Press, 1985. ISBN: 978-0-262-02217-0.
- [13] ZIEMKE, D.; KADDOURA, I.; NAGEL, K.: „The MATSim Open Berlin Scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data“. In: *Procedia Computer Science* 151 (2009), S. 870–877. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.120.
- [14] BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT, Hrsg.: *Pendlerstatistik 2010*. CD-ROM. Nürnberg, 2010.
- [15] EWERT, R.; GRAHLE, A.; MARTINS-TURNER, K.; SYRÉ, A.; NAGEL, K.; GÖHLICH, D.: „Electrification of Urban Waste Collection: Introducing a Simulation-Based Methodology for Feasibility, Impact and Cost Analysis“. In: *International Journal of Sustainable transportation* (2020), S. 870–877. DOI: 10.14279/depositononce-10314.
- [16] OPENSTREETMAP-MITWIRKENDE: *OpenStreetMaps.org*. lizenziert unter CC-BY-SA-Lizenz 2.0. 2020. URL: <https://www.openstreetmap.org/copyright> (besucht am 16.06.2020).
- [17] SCHRÖDER, S.: *Jspriit*. 2017. URL: <https://github.com/graphhopper/jspriit> (besucht am 28.06.2020).

- [18] PANDER, J.: „Her mit den sauberen Riesen“. In: *Zeit Online* (2020). URL: <https://www.zeit.de/2020/03/elektro-lkw-stromschiene-e-mobilitaet-klimaschutz> (besucht am 28.06.2020).
- [19] „Directive 2015/719 of the European Parliament and of the Council“. In: *Legislation L 115* (2015). Hrsg. von EUROPEAN UNION. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2015:115:FULL&from=EN> (besucht am 05.01.2020).
- [20] HACKER, F.; WALDENFELS, R. von; MOTTSCHALL, M.: *Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen*. Hrsg. von ÖKO-INSTITUT. 2015. URL: <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/wirtschaftlichkeit-von-elektromobilitaet-in-gewerblichen-anwendungen/> (besucht am 01.05.2020).
- [21] BLOOMBERGNEF, Hrsg.: *Electric Vehicle Outlook 2020*. 2020. URL: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/> (besucht am 29.06.2020).
- [22] YANG, X.-G.; ZHANG, G.; GE, S.; WANG, C.-Y.: „Fast Charging of Lithium-Ion Batteries at All Temperatures“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (28 2018), S. 7266–7271. DOI: 10.1073/pnas.1807115115.
- [23] KIVEKAS, K.; VEPSALAINEN, J.; TAMMI, K.: „Stochastic Driving Cycle Synthesis for Analyzing the Energy Consumption of a Battery Electric Bus“. In: *IEEE Access* 6 (2018), S. 55586–55598. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2871574.
- [24] LEIPZIGER INSTITUT FÜR ENERGIE, Hrsg.: *Emissionskataster 2015*. 2016. URL: [https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/luftqualitaet/de/emissionen/verkehr\\_kfz.shtsh](https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/luftqualitaet/de/emissionen/verkehr_kfz.shtsh) (besucht am 28.06.2020).
- [25] BERLINER STADTREINIGUNG, Hrsg.: *Tarifmodell der BSR*. 2020. URL: <https://www.bsr.de/tarifmodell-20989.php> (besucht am 29.06.2020).
- [26] BISCHOFF, J.; MACIEJEWSKI, M.: „Electric Taxis in Berlin – Analysis of the Feasibility of a Large-Scale Transition“. In: *Tools of Transport Telematics TST* 531 (2015), S. 343–351. DOI: 10.1007/978-3-319-24577-5\_34.
- [27] NEUMANN, P.: „Berliner Elektrobusse: Heizungen und Klimaanlage werden mit Diesel betrieben“. In: *Berliner Zeitung* (2018). URL: <https://www.berliner-zeitung.de/mensch-metropole/berliner-elektrobusse-heizungen-und-klimaanlagen-werden-mit-diesel-betrieben-li.15146> (besucht am 28.06.2020).
- [28] BISCHOFF, J.; MACIEJEWSKI, M.: „Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin“. In: *Procedia computer science* 83 (2016), S. 237–244. DOI: 10.1016/j.procs.2016.04.121.
- [29] VOSOOGHI, R.; PUCHINGER, J.; BISCHOFF, J.; JANKOVIC, M.; VOULLON, A.: „Shared Autonomous Electric Vehicle Service Performance: Assessing the Impact of Charging Infrastructure and Battery Capacity“. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 81 (2020), S. 237–244. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102283.
- [30] ZEUS, Hrsg.: *ZeEUS eBus Report #2. An updated overview of electric buses in Europe*. 2017. URL: <https://www.sustainable-bus.com/wp-content/uploads/2018/06/zeus-ebus-report-2.pdf> (besucht am 28.06.2020).
- [31] JEFFERIES, D.; GÖHLICH, D.: „Integrated TCO Assessment of Bus Network Electrification Considering Rescheduling and Delays“. In: Okt. 2018. URL: [https://www.researchgate.net/publication/329210166\\_Integrated\\_TCO\\_Assess\\_of\\_Bus\\_Network\\_Electrification\\_Considering\\_Rescheduling\\_and\\_Delays](https://www.researchgate.net/publication/329210166_Integrated_TCO_Assess_of_Bus_Network_Electrification_Considering_Rescheduling_and_Delays) (besucht am 28.06.2020).

## Biografische Notizen

**Prof. Dr. Kai Nagel** ist Professor am Fachgebiet für Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik an der Technischen Universität Berlin und forscht u. a. zu den Themen der Verkehrssystemplanung und dem Zusammenspiel der verschiedensten Verkehrsträger sowie der Verkehrstelematik, die sich mit der Steuerung dieser verschiedenen Verkehrssysteme auseinandersetzt. Zusätzlich ist K. Nagel Mitentwickler der Verkehrssimulationssoftware MATSim, die heute einen wichtigen Bestandteil der Forschung am Lehrstuhl darstellt. Da Herr Baar ein Unterstützer des Verbrennungsmotors war und Herr Nagel sich ausführlich mit der Dekarbonisierung des Verkehrs beschäftigt, fehlt Herr Baar als kompetenter Diskussions- und Gesprächspartner bei der Bewertung zukünftiger Verkehrskonzepte.

**Ricardo Ewert** ist seit 2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik an der Technischen Universität Berlin. Im Jahr 2019 hat er sein Masterstudiengang als Wirtschaftsingenieur an der TU Berlin abgeschlossen und beschäftigt sich seitdem vorrangig mit dem urbanen Güterverkehr und den entsprechenden Möglichkeiten und Bedingungen der Einführung rein elektrischer Fahrzeugflotten.

**Dr. Joschka Bischoff** war bis Mitte 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik an der Technischen Universität Berlin. Er forschte hauptsächlich mit Hilfe von MATSim an diversen zukunftsrelevanten Szenarien, wie der Verwendung autonomer Fahrzeuge oder der Elektrifizierung von ganzen Taxiflotten. Inzwischen ist er Mitarbeiter bei den Schweizer Bundesbahnen (SBB), wo er u. a. mit Hilfe von MATSim die Interaktion zwischen Eisenbahn und modernen Bedienformen untersucht und weiterentwickelt.

**Dr. Michal Maciejewski** war u. a. Dozent an der Poznan University of Technology, ist langjähriger wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik an der Technischen Universität Berlin, und gleichzeitig Softwareentwickler im Verkehrsbereich. Er ist der Hauptautor der MATSim-Plugins, welche die Simulation der Bedarfsverkehre (Taxis, Robotaxis, ...) leisten.

**Alexander Grahle** ist seit September 2018 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik an der Technischen Universität Berlin beschäftigt. Er ist dabei verantwortlich für das Projekt „Analyse von Strategien zur vollständigen Dekarbonisierung des urbanen Verkehrs“. Die während seines Studiums im Bereich Maschinenbau besuchten Veranstaltungen von Herrn Baar blieben Herrn Grahle in lehrreicher Erinnerung.