

Sammelverkehr mit autonomen Fahrzeugen im ländlichen Raum

Zur Zukunft des ÖPNV in dünn besiedelten Gebieten

Dr.-Ing. Moritz von Mörner, Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze; Darmstadt

Aktuelle demografische und gesellschaftliche Entwicklungen stellen den liniengebundenen ÖPNV vor allem im ländlichen Raum vor große Herausforderungen. Auswirkungen des demografischen Wandels zeigen sich inzwischen nicht nur in ländlichen Räumen, sondern zunehmend auch in Randbereichen von Ballungsräumen. Besonders sinkende Schülerzahlen haben Auswirkungen auf den ÖPNV, da Schüler derzeit im ländlichen Raum die Hauptnutzergruppe darstellen. Hinzu kommt ein Rückgang der Fahrgastzahlen durch sinkende Bevölkerungszahlen [1]. Für die Verkehrsbetriebe wird damit die wirtschaftliche Basis für das Vorhalten öffentlicher Verkehre immer weiter geschwächt.

Als Folge werden im ländlichen Raum herkömmliche Linienverkehre oft nur noch als

vereinzelte Verbindungen zum nächstgrößeren Zentrum und für den Schülerverkehr angeboten, womit nur ein Teil der Daseinsvorsorge als abgedeckt angesehen werden kann. Eine freie Entfaltung der Mobilität ist damit ohne den privaten Pkw oft nicht möglich. Hinzu kommt, dass es gerade mit Blick auf den demografischen Wandel im ländlichen Raum zunehmend ältere Menschen geben wird [1, 2], die nicht mehr Auto fahren können oder wollen. Ihnen stehen kaum noch Möglichkeiten zur Verfügung, ihre Wünsche nach Mobilität zu befriedigen. Es stellt sich daher die Frage, wie Mobilität und damit gesellschaftliche Teilhabe im ländlichen Raum auch zukünftig sichergestellt werden kann.

Eine Möglichkeit, Nahmobilität im ländlichen Raum zu gewährleisten, ist der Einsatz flexibler Angebotsformen (zum Bei-

spiel AST-Verkehre). Weitere, heute bereits eingesetzte, flexible Verkehre umfassen Linienverkehre mit bedarfsabhängiger Linienabweichung oder Linienaufweitung sowie bedarfsabhängige Zubringer- und Abbringerverkehre mit Anschluss an Linienverkehre durch Korridor- und Sektorenbetrieb. Alternative Angebote, die laut Personenbeförderungsgesetz nicht zum öffentlichen Verkehr gehören, sind Car Sharing und Mitfahrgelegenheiten, die allerdings in ländlichen Räumen durch geringe Nachfrage bisher keine weite Verbreitung finden. Demgegenüber stehen aber auch positive Entwicklungen im technischen Bereich. Neben Verbesserungen in den Informations- und Kommunikationstechniken, die eine wichtige Voraussetzung für bedarfsabhängige Bedienformen sind, gerät insbesondere der Einsatz autonomer Fahrzeuge zunehmend in den Fokus [3]. Für Ballungsräume gibt es bereits Studien zum Einsatz von Sammelverkehren mit autonomen Fahrzeugen (vergleiche zum Beispiel [4], [5], [6]).

Für den ländlichen Raum ist jedoch bisher nicht untersucht worden, ob die vergleichsweise geringe Verkehrsnachfrage auf einer größeren Fläche einen effizienten Betrieb von Sammelverkehren mit autonomen Fahrzeugen erlaubt. Angesichts des hohen Anteils der Personalkosten an den Gesamtkosten im öffentlichen Verkehr versprechen autonome Fahrzeuge gerade bei einer kleinteiligen, flexiblen Bedienung im ländlichen Raum erhebliche wirtschaftliche Vorteile. Durch die Kombination bedarfsabhängiger Bedienformen mit autonomen Fahrzeugen könnte auch die Möglichkeit entstehen, dort das Angebot an öffentlichem Verkehr wieder zu stärken und neue Nutzergruppen zu gewinnen.

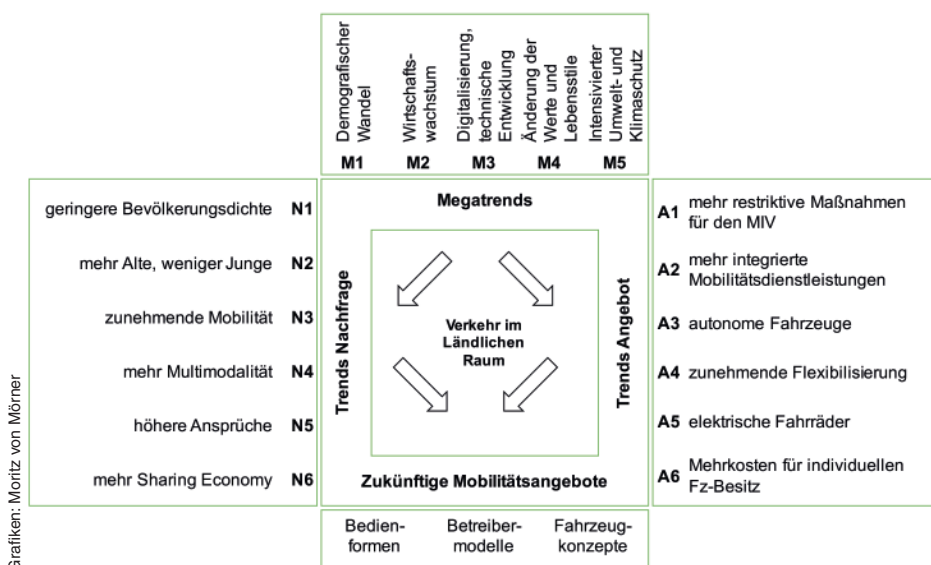


Abb. 1: Trends in der Entwicklung von Verkehrsnachfrage und Verkehrsangebot.

Grafiken: Moritz von Mörner

Vor diesem Hintergrund berichtet dieser Beitrag über eine Studie, mit der die Umsetzbarkeit und die Effizienz eines flexiblen Sammelverkehrs im ländlichen Raum auf Basis autonomer Fahrzeuge abgeschätzt werden sollte. Hierfür wurde ein agentenbasiertes Simulationsmodell entwickelt und angewendet.

Die Studie wurde nach einer Ausschreibung von der DB Regio AG und der Opel Automobile GmbH beauftragt und im Rahmen der Innovationsallianz zwischen DB AG und TU Darmstadt durchgeführt.

Fokus auf 2030

Bis zum flächendeckenden Einsatz autonomer Fahrzeuge wird es voraussichtlich nur wenige Jahre dauern. Für die Umsetzung eines Sammelverkehrs, der solche Fahrzeuge nutzt, wurde hier der Zeithorizont 2030 gewählt, weil hierfür auf mehrere Prognosen zurückgegriffen werden kann [7]. Um die Veränderungen bis 2030 in Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage in das zu entwickelnde Simulationsmodell einfließen zu lassen, wurden fünf gesellschaftliche Megatrends (M1 bis M5) identifiziert, die sich auf Mobilität im ländlichen Raum auswirken werden (Abb. 1). Aus diesen Megatrends wurden Trends in der Verkehrsnachfrage (N1 bis N6) und im Verkehrsangebot (A1 bis A6) identifiziert.

Die Auswirkungen der verschiedenen Trends in Nachfrage und Angebot sind sehr vielfältig. Für die Prognose für das Jahr 2030 wurden aus den Trends der Abbildung 1 folgende wesentliche Trends und Auswirkungen identifiziert und bei der Umsetzung des Modells zur Simulation von Sammelverkehren mit autonomen Fahrzeugen berücksichtigt:

- N1 Geringere Bevölkerungsdichte:
 - Anpassung der Nachfrage an die Bevölkerungsprognose des ausgewählten Landkreises.
- N2 Mehr Alte, weniger Junge: Annahme, dass 60-jährige 2030 ein ähnliches Mobilitätsverhalten aufweisen, wie 60-jährige heute:
 - Anteilige Veränderung der Wegezwecke durch Änderung der Bevölkerungszusammensetzung.
 - Berücksichtigung durch die Prognose zur Bevölkerungsentwicklung im Landkreis.
- N3 Zunehmende Mobilität:
 - Simulation mit unterschiedlichen Nachfrageniveaus.



Zum Autor

Dr.-Ing. Moritz von Mörner (33) hat im Juli 2018 die Geschäftsführung im Planungsbüro von Mörner in Darmstadt übernommen und beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit Fragen der innerstädtischen Mobilität. Zuvor war er bis Juni 2018 sechs Jahre wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Darmstadt. Am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik promovierte er zum Einsatz autonomer Sammelverkehre mit Fokus auf den ländlichen Raum. Zusätzlich forschte er zur intermodalen Reisendenstromlenkung und zur Nutzung von Mobilfunkdaten für die Verkehrsanalyse.



Zum Autor

Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze (61) ist Bauingenieur und seit 1997 Professor für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik an der TU Darmstadt. In der Innovationsallianz seiner Universität mit der Deutschen Bahn leitet er die Arbeitsgruppe „Connected Mobility“. Seine Forschungsarbeiten umfassen ein breites Themenspektrum, unter anderem Planungsmethodik, Verkehrsmanagement, Reisendenstromlenkung, Mobility Pricing, Lichtsignalsteuerung, Elektrifizierung des Straßenschwerverkehrs oder Gesundheitseinflüsse des Verkehrs. 190 Veröffentlichungen, Mitgliedschaften in Beiräten (unter anderem des Nahverkehrs bis 2017) und Beratungsgremien sowie zahlreiche internationale Aktivitäten sind Ausdruck seines umfassenden Engagements zur Förderung von Forschung und Lehre in seiner Disziplin.

- N4 Mehr Multimodalität: Umlegung auf ein modernes Mobilitätskonzept, das in sich erst einmal modal ist, aber viele Verknüpfungspunkte bieten kann.
 - Simulation mit unterschiedlichen Nachfrageniveaus.
- N5 Höhere Ansprüche: Pünktlichkeit und spontane Wünsche nach Ortsveränderung.
 - Implementierung eines geringen Umwegfaktors für Fahrgäste im Sammelverkehr.
 - Flexible Bedienung durch viele Haltestellen, die einer Tür-zu-Tür-Bedienung nahe kommen.
 - Überprüfung der Effizienz des Systems bei kurzer Anmeldefrist für die Fahrtwünsche.
- N6 Mehr Sharing Economy: Erhöhte Bereitschaft, Verkehrsmittel gemeinsam zu nutzen.
 - Betrachtung von Sammelverkehren bei unterschiedlichen Nachfrageniveaus.
- A2 Mehr integrierte Mobilitätsdienstleistungen:
 - Komfortable Tür-zu-Tür-Bedienung.
 - Fahrtanmeldung und Disposition über eine zentrale Stelle.
 - Zum Nutzer hin keine Unterscheidung mehrerer Fahrtanbieter.
- A3 Autonome Fahrzeuge: Fokus auf eine Simulation von autonomen Fahrzeugen.
 - Berücksichtigung von Pausenregelungen für Fahrer nicht notwendig.
- A4 Zunehmende Flexibilisierung:

Äußerst flexibler kleinteiliger Sammelverkehr.

- Modellierung von kleinen Fahrzeugen mit vier und acht Sitzen.
- Überprüfung der Effizienz des Systems bei kurzer Anmeldefrist für die Fahrtwünsche.

Zur Evaluierung des angewendeten Modells wird auf einen realen Landkreis zurückgegriffen, für den von Seiten der DB Regio eine sehr umfassende Haushaltsbefragung bereitgestellt wurde. Aus der Analyse dieser Haushaltsbefragungen wurde die Nachfrage des Status Quo (126.300 Wege/Dienstag) ermittelt und anschließend auf den Prognosehorizont 2030 (99.500 Wege/Dienstag) extrapoliert. Die folgenden Nachfrageniveaus wurden für die Implementation in der Simulation gewählt:

- ~ 12 Prozent ÖV-Nachfrage (entspricht der heutigen ÖV-Nachfrage),
- ~ 20 Prozent ÖV-Nachfrage (angestrebte Nachfrage nach Umsetzung – niedrig),
- ~ 35 Prozent ÖV-Nachfrage (angestrebte Nachfrage nach Umsetzung – hoch),
- ~ 75 Prozent ÖV-Nachfrage (alle Wege, die länger als fünf Minuten/eine Minute bei Senioren ausfallen).

Es fällt schwer, räumliche Grenzen für das zu erstellende Modell zu ziehen, da Mobilität Raumgrenzen überschreitet und dementsprechend umfassend betrachtet werden muss [8]. Mit dem Fokus des Modells auf einen ganzen Landkreis im ländlichen



Abb. 2: Screenshot aus dem Modell.

Raum, wurden die wichtigsten angrenzenden Städte (Mittel- und Oberzentren) mit in die Betrachtung aufgenommen. Diese ergeben sich aus der Häufung der Ziellänge in der zugrundeliegenden Haushaltsbefragung.

Beschreibung des verwendeten Modells

Zur Abschätzung, ob Sammelverkehren mit autonomen Fahrzeugen im ländlichen Raum sinnvoll eingesetzt werden können, kommt ein eigens für diesen Zweck entwickeltes agentenbasiertes Modell zum Einsatz (siehe Screenshot in Abb. 2). Das Modell wurde mit AnyLogic erstellt und greift

für das Routing auf das Kartenmaterial von OpenStreetMaps zurück [9]. Es bildet die Fahrplanfragen, die Fahrzeuge und den Disponenten ab. Hierbei handelt es sich nicht um ein vollständiges Verkehrssimulationsmodell, sondern es werden nur die Fahrzeuge im Sammelverkehr betrachtet.

Haltestellen

Für das Modell wurden virtuelle Haltestellen mit einem Radius von 100 m verwendet, was einer Tür-zu-Tür-Bedienung nahe kommt und die Programmierung vereinfacht hat. Die Haltestellen wurden so verteilt, dass alle besiedelten Flächen abgedeckt sind (siehe Kartenausschnitt

in Abb. 4 und Abb. 5). Zusätzlich zu den besiedelten Flächen des Landkreises werden die wichtigsten angrenzenden Städte und spezifische Orte des täglichen Bedarfs (Nahversorger, Schulen, Ärztezentren) als Haltestellen implementiert.

Disponent

Die Fahrplanfragen erreichen den Disponenten in diesem Beispiel zwei Stunden vor Fahrtbeginn. Der Disponent arbeitet die Fahrplanfragen sequenziell ab und weist jeder Fahrplanfrage ein passendes Fahrzeug zu. Ziel der Dispositionsstrategie ist es, Fahrzeuge möglichst gut auszulasten und gleichzeitig den durchschnittlichen Um-

ANZEIGE

Mehr Freude Die MultiClass 400. am Sparen.



Ansichtsexemplar bereitgestellt über **Bus&Bahn**

weg aller Nutzer möglichst klein zu halten. Mehrere Abbruchkriterien sind in der Zuteilung der Fahrthanfrage zu einem Fahrzeug implementiert. Das wohl wichtigste Kriterium betrifft den für jeden Fahrgast einzuhaltenden maximalen Umweg. Die Fahrzeit darf das 1,4-fache der kürzesten Quelle-Ziel-Verbindung nicht überschreiten, weder für die aktuell betrachtete Fahrtanfrage noch für die bereits im Fahrzeug befindlichen Passagiere. Die Auswirkungen kürzerer Anmeldefristen und geringerer maximaler Umwegfaktoren wurden zusätzlich überprüft und führten zu ähnlichen Ergebnissen mit nur geringen Effizienzeinbußen.

Fahrzeuge

Die Fahrzeuge sind zu Beginn der Simulation zufällig auf die virtuellen Haltestellen im Gebiet verteilt. Dadurch stehen in dichter besiedelten Gebieten mit einer höheren Anzahl an Haltestellen mehr Fahrzeuge. Die Fahrzeuge bekommen ihre Fahrtaufträge durch den Disponenten zugewiesen und fahren diese ab. Störungen im Verkehrsfluss oder das Nichterscheinen

Abb. 3: Eingabemaske bei Modellstart.

Einzelner Lauf
Läufe aus Tabelle

Angebot

Flottengröße	<input type="text" value="1000"/>	Fahrzeuge
Anteil mit 4 Sitzplätzen	<input type="text" value="100.0"/>	%
Anteil mit 8 Sitzplätzen	<input type="text" value="0.0"/>	%
Route anzeigen	<input type="text" value="Zufall"/>	Fz index
Fahrzeug Reichweite	<input type="text" value="-"/>	km
Fahrzeug Pausen Dauer	<input type="text" value="-"/>	min
Disponent	<input type="text" value="maximale Effizienz"/>	

START

Laden während ungeplanten Pausen

Nachfrage

Nur Landkreis

	Modal Split des "off. Verkehrs"	Maximaler Umwegfaktor	Flexibilität [Minuten]	Minimum Wegezeit PkV [Minuten]
Gesamt	<input type="text" value="100.0"/> <input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.4"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="30.0"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="5"/> <input type="checkbox"/>
Erwerbstätige	<input type="text" value="35"/>	<input type="text" value="1.4"/>	<input type="text" value="30.0"/>	<input type="text" value="5.0"/>
Schüler	<input type="text" value="15.0"/>	<input type="text" value="1.4"/>	<input type="text" value="30.0"/>	<input type="text" value="5.0"/>
Auszubildende	<input type="text" value="50.0"/>	<input type="text" value="1.4"/>	<input type="text" value="30.0"/>	<input type="text" value="5.0"/>
Rentner	<input type="text" value="45.0"/>	<input type="text" value="1.4"/>	<input type="text" value="30.0"/>	<input type="text" value="1.0"/>
Sonstige	<input type="text" value="40.0"/>	<input type="text" value="1.4"/>	<input type="text" value="30.0"/>	<input type="text" value="5.0"/>

von Fahrgästen werden vorerst nicht betrachtet. Die Fahrzeugflottengröße wurde vorab bestimmt. Dies geschah mit der Zielsetzung, Flottengrößen zu identifizieren, die mit möglichst wenigen Fahrzeugen die

angestrebte Nachfrage komplett abdecken können (Tab. 1).

Das Modell wurde so konzipiert, dass verschiedene Parameter variiert werden kön-



Setra - Eine Marke der Daimler AG

Ob UL, H-Wagen oder die business-Modelle: Die MultiClass bietet nicht nur genau das richtige Fahrzeug für Ihre Herausforderungen, sondern ist auch verblüffend wirtschaftlich. Wie effizient sie ist, rechnen wir Ihnen gerne vor. Mehr unter www.setra-bus.com



Ansichtsexemplar bereitgestellt über **Bus & Bahn**

The Sign of Excellence.

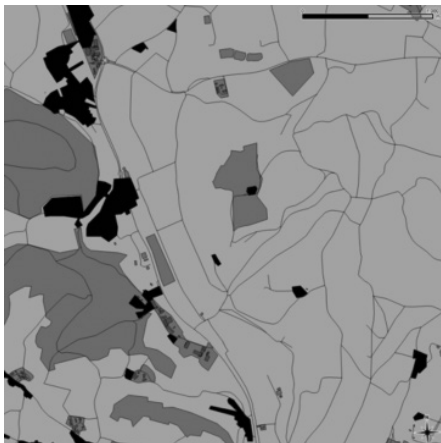


Abb. 4: Kartenausschnitt bebautes Gebiet (schwarz).

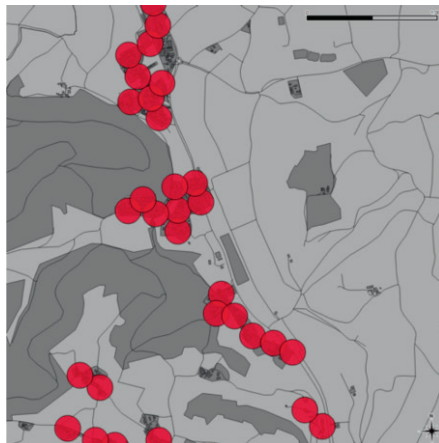


Abb. 5: Bebautes Gebiet (schwarz) überlagert mit Haltestellen mit 100 m-Radius (rot).

Wesentliche Ergebnisse

Sammelverkehr mit autonomen Fahrzeugen im ländlichen Raum kann sinnvoll auch bei geringem Nachfrageniveau umgesetzt werden. Bei steigenden Nachfrageniveaus und daran angepasster Fahrzeugflotte erhöht sich die Effizienz des Flotteneinsatzes.

Für einen Blick in die Zukunft kann attestiert werden, dass grundsätzlich die gesamte Verkehrsnachfrage des betrachteten Landkreises mit etwa 125.000 Wegen pro Tag durch den Einsatz von etwa 2800 Fahrzeugen im Sammelverkehr abgedeckt werden könnte. Heute sind in dem betrachteten Landkreis etwa 45.000 Fahrzeuge zugelassen.

Verkehrsleistung

Der Anteil der Leerkilometer von Fahrzeugen des Sammelverkehrs bleibt über die verschiedenen Szenarien konstant und pendelt sich bei rund 17 Prozent für alle Szenarien ein (Abb. 6). Es wurde ein kilometerbasierter Tarif angenommen. Der Anteil der abrechenbaren Kilometer beschreibt dabei die Summe der kürzesten Quelle-Ziel-Verbindungen aller beförderten Personen im Verhältnis zu den tatsächlich von den Fahrzeugen gefahrenen Distanzen. Der Anteil der abrechenbaren Kilometer steigt mit zunehmender Nachfrage und angepasster Flottengröße. So können in den Szenarien mit viersitzigen Fahrzeugen Anteile von 134 bis 165 Prozent abgerechnet werden. In den Szenarien mit achtsitzigen Fahrzeugen können den Nutzern weit größere Kilometeranteile in Rechnung gestellt werden. Werte von 140 bis 198 Prozent der tatsächlich gefahrenen Kilometer werden erreicht.

Als Beispiel sind in Abbildung 7 die zurückgelegten und die abrechenbaren Kilometer der Szenarien mit 35 Prozent Nachfrage dargestellt, um den Unterschied der Nutzung von vier- und achtsitzigen Fahrzeugen zu verdeutlichen.

Fahrzeugeinsatz

Alle im Modell zur Verfügung stehenden Fahrzeuge werden im Tagesverlauf eingesetzt. Allerdings geschieht dies nicht immer gleichzeitig. Auch zu den Spitzenzeiten, unter der Maßgabe, dass alle Fahrtenfragen bedient werden sollen, werden nicht alle Fahrzeuge zeitgleich eingesetzt. Als Beispiel sind in Abbildung 8 die eingesetzten Fahrzeuge im Tagesverlauf der Szenarien mit 35 Prozent Nachfrage dar-

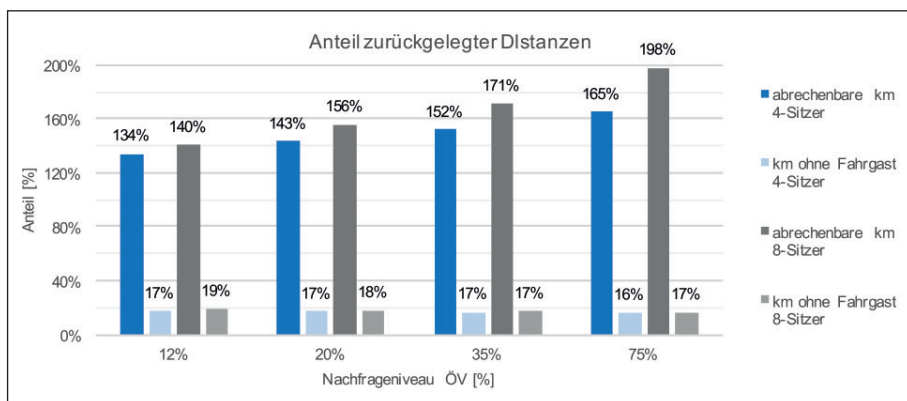


Abb. 6: Anteil abrechenbare Kilometer und Kilometer Leerfahrten, an den gefahrenen Kilometern (Flottengröße 1000 viersitzige und 850 achtsitzige Fahrzeuge, Nachfrageniveau 35 Prozent der 125.000 Wege/Tag)

nen. Grundlegende Erkenntnisse konnten bereits aus Simulationsläufen zu verschiedenen Nachfrageniveaus und Fahrzeuganzahlen gezogen werden. Zusätzlich wurden in weiteren Simulationsläufen verschiedene Fahrzeuggrößen (vier- und achtsitzige Fahrzeuge), Voranmeldefristen (2 h vorher, 30 min vorher, spontan), Flexibilität in der

gebuchten Abfahrzeit (+/-30 min, +/-10 min, +/-0 min), maximale Umwege der Nutzer (1,4-facher, 1,2-facher, 1,0-facher Zeitbedarf gegenüber der kürzesten Quelle-Ziel Verbindung für den Fahrgast) und die Möglichkeit, diesen Dienst mit batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen zu betreiben (Reichweite 350 km, Ladedauer 1 h), betrachtet.

Tab.1: Ermittelte Flottengrößen, um die Nachfrage zu X % abzudecken.

	Flottengröße					
	2012			2030		
	Anzahl Wege/Tag	Anzahl 4-Sitzer	Anzahl 8-Sitzer	Anzahl Wege/Tag	Anzahl 4-Sitzer	Anzahl 8-Sitzer
~ 12% Nachfrage	14.940	400 Fz	350 Fz	12.191	350 Fz	325 Fz
~ 20% Nachfrage	24.345	625 Fz	550 Fz	19.106	475 Fz	400 Fz
~ 35% Nachfrage	42.200	1000 Fz	850 Fz	33.766	750 Fz	675 Fz
~ 75% Nachfrage	93.600	2100 Fz	1650 Fz	74.540	1550 Fz	1250 Fz

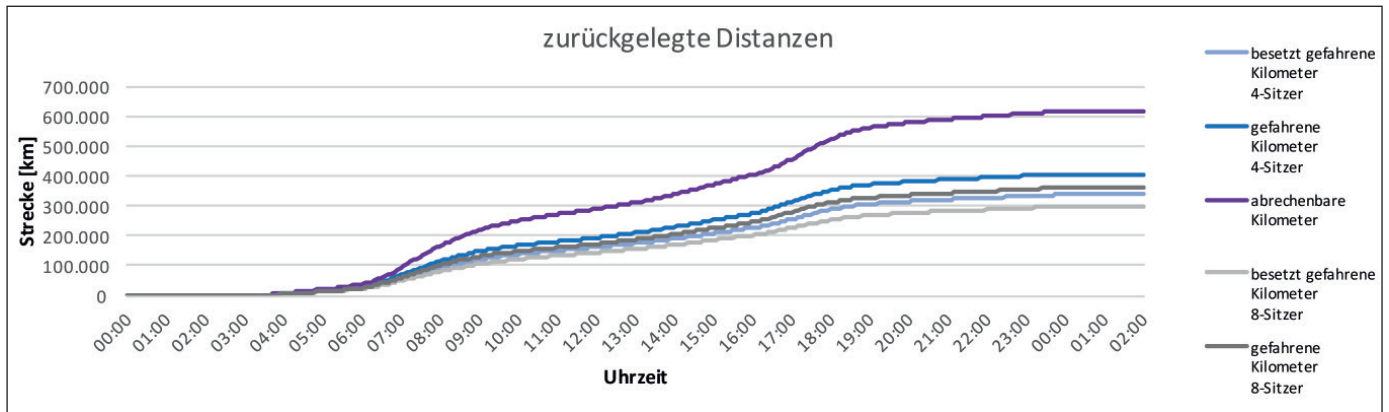


Abb.7: Zurückgelegte Distanzen im Tagesverlauf (Flottengröße und Nachfrageniveau wie in Abb. 6).

gestellt, um den Unterschied im Einsatz von vier- und achtsitzigen Fahrzeugen zu verdeutlichen.

In den Spitzenzeiten sind 15 bis 20 Prozent der Fahrzeuge leer auf Dispositionsfahrt, um den nächsten Nutzer abzuholen.

Bei viersitzigen Fahrzeugen sind in den Nachfragespitzen etwa 25 Prozent der Fahrzeuge voll besetzt. Werden ausschließlich achtsitzige Fahrzeuge eingesetzt, sind in den Nachfragespitzen etwa 20 Prozent der Fahrzeuge mit mehr als vier Passagieren belegt. In den Schwachlastzeiten weisen sowohl vier- als auch achtsitzige Fahrzeuge hauptsächlich eine Besetzung von ein bis zwei Personen/Fahrzeug auf. Abbildung 9 zeigt beispielhaft die Fahrzeugbesetzung von achtsitzigen Fahrzeugen im Tagesverlauf. Der Fahrzeugeinsatz folgt den typischerweise bekannten Ganglinien für die Verkehrsnachfrage mit ausgeprägten Spitzen am Vor- und Nachmittag.

Erkenntnisse zur Machbarkeit und Effizienz

Die wichtigsten Erkenntnisse zur Machbarkeit und Effizienz eines Sammelverkehrs mit autonomen Fahrzeugen im ländlichen Raum können wie folgt zusammengefasst werden:

■ Der mittlere Besetzungsgrad der Fahrzeuge nimmt bei steigender Nachfrage und daran angepasster Fahrzeugflotte zu.

Der mittlere Besetzungsgrad bewegt sich in den Szenarien mit geringer Nachfrage um zwei Personen/Fahrzeug, in den Szenarien mit höherer Nachfrage um 2,5 Personen/Fahrzeug. Szenarien mit einer Fahrzeugflotte aus achtsitzigen Fahrzeugen weisen einen etwas

höheren Mittelwert auf. Gerade in den Spitzenstunden macht sich die zusätzliche Kapazität der Fahrzeuge bemerkbar. In den nachfragestarken Szenarien mit achtsitzigem Fahrzeug steigt der durchschnittliche Besetzungsgrad in den Tagesspitzen bis über drei Personen/Fahrzeug.

■ Der Anteil der abrechenbaren Kilometer steigt und der Anteil der leer gefahrenen Strecken fällt bei steigender Nachfrage und daran angepasster Fahrzeugflotte.

Bei steigender Nachfrage nimmt in einem kilometerbasierten Tarif der Anteil an abrechenbaren Kilometern zu. Eine effizientere Ressourcennutzung ist so möglich. Eine Ursache ist das bei höherer Nachfrage größere Bündelungspotenzial für die Fahrten der Fahrgäste. Eine andere Ursache ist, dass nicht abrechenbare Dispositionsfahrten – Fahrten ohne Fahrgast, um zum nächsten Fahrgast zu gelangen – kürzer werden.

■ Die Fahrzeuge weisen eine hohe Tagesfahrleistung auf und befördern eine hohe Anzahl an Fahrgästen.

Die mittlere Tagesfahrleistung der Fahrzeuge liegt in allen Szenarien zwischen 360 und 490 km. Überschlägig hochgerechnet auf ein Jahr (Faktor 300) entspricht dies 108.000 bis 150.000 km Jahresfahrleistung. Ohne Ausgleichsbemühungen in der Dispositionsstrategie ist die Abweichung der Extremwerte deutlich, denn einzelne Fahrzeuge legen über 900 km an einem Tag zurück, andere Fahrzeuge haben nur eine sehr geringe Tagesfahrleistung. Ein heutiges batterieelektrisches Fahrzeug müsste bei dieser hohen Kilometerleistung mehrfach zwischengeladen werden. Möglichkeiten für eine optimierte Disposition zur gleichmäßigeren Fahrzeugauslastung über Tag und Jahr wurden noch nicht untersucht.

Der Mittelwert der beförderten Fahrgäste je Fahrzeug liegt je nach Nachfrageniveau bei 35 bis 65 Fahrgästen/Tag.

■ Bei Einsatz von achtsitzigen Fahrzeugen weisen maximal 20 Prozent im Tagesverlauf irgendwann einen Besetzungsgrad über vier auf. Dieser Anteil ist eher gering.

Vorteile bringen die größeren Fahrzeuge vor allem während der Nachfragespitzen. Allerdings werden auch in den Spitzen maximal etwa 20 Prozent der Fahrzeuge mit mehr als vier Fahrgästen besetzt. Während der Schwachlastzeiten werden die großen Fahrzeuge kaum ausgenutzt. Dementsprechend scheint eine optimierte Kombination beider Fahrzeuggrößen in einer Fahrzeugflotte sinnvoll.

■ Um Sammelverkehre effizient gestalten zu können, ist bereits ein geringes Maß an Flexibilität bei den Nutzern ausreichend.

Die Gegenüberstellung von Szenarien mit einer Flexibilität der gebuchten Abfahrtszeit von zehn statt 30 Minuten zeigt sehr ähnliche Ergebnisse. Allerdings kann bei geringer Flexibilität ein sehr kleiner Anteil der Fahrgäste (0,2 Prozent) nicht im gewünschten Zeitfenster bedient werden. Hingegen zeigen die Szenarien mit einer Flexibilität der gebuchten Abfahrtszeit von 0 Minuten eine deutliche Verminderung der Effizienz des Flotteneinsatzes. Der Anteil der Leerkilometer steigt auf 27 Prozent und der Anteil der abrechenbaren Kilometer fällt auf knapp 80 Prozent. Eine zeitliche Flexibilität der Nutzer ist also notwendig, um Sammelverkehre effizient disponieren zu können. Allerdings ist ein geringes Maß an Flexibilität bereits ausreichend. Somit kann auch ein relativ komfortabler Sammelverkehr effizient umgesetzt werden.

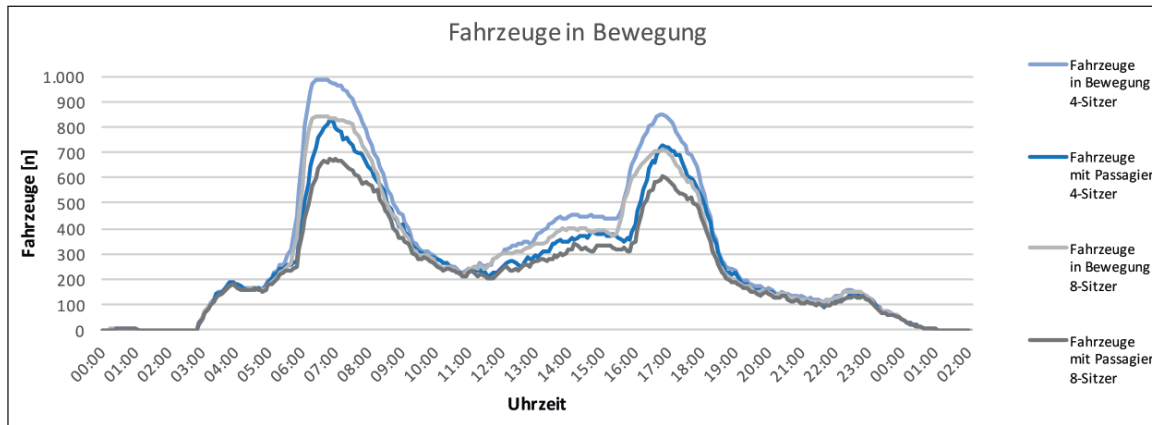


Abb. 8: Eingesetzte Fahrzeuge im Tagesverlauf (Vergleich 1000 viersitzige und 850 achtsitzige Fahrzeuge, Nachfrageniveau 35 Prozent der 125.000 Wege/Tag).

■ **Für die Umsetzung von Sammelverkehren und für einen effizienten Flotteneinsatz reicht auch im ländlichen Raum eine Voranmeldung der Fahrtwünsche 30 Minuten vor der Fahrt aus.**

Eine Voranmeldedfrist von 30 Minuten erhöht den Komfort der Fahrtbuchung erheblich im Vergleich zu einer Voranmeldedfrist von zwei Stunden. Um die Fahrtanfragen abzudecken, wären jedoch 200 weitere Fahrzeuge notwendig. Mit einer angepassten Disposition könnte der Erweiterung der Fahrzeugflotte entgegengewirkt werden. Im Vergleich dazu führt eine spontane Voranmeldung mit einer Frist von nur sechs Minuten dazu, dass gut acht Prozent der Fahrtanfragen nicht im Rahmen der gesetzten Abfahrzeitflexibilität von +/- 30 Minuten bedient werden können. Eine Voranmeldedfrist von 30 Minuten erscheint im ländlichen Raum gut geeignet, um einerseits eine noch halbwegs spontane Fahrtbuchung zu ermöglichen und andererseits das Bündelungspotenzial nicht zu sehr zu beschneiden.

■ **Um Sammelverkehre umsetzen zu können, muss den meisten Fahrgästen ein Umweg zugemutet werden.**

Allerdings muss dieser Umweg nicht besonders groß ausfallen.

Die Auswertung der Ergänzungsszenarien zeigt, dass Veränderungen im zulässigen zeitlichen Umwegfaktor zwar Auswirkungen auf die Effizienz des Flotteneinsatzes haben. Jedoch bringt eine Veränderung von 1,4 auf 1,2 nur geringe Auswirkungen mit sich, die auch noch zum Teil mit einer angepassten Disposition ausgeglichen werden könnten. Bei einem maximal zulässigen Umwegfaktor von 1,2 ergibt sich im Mittel aller Fahrten nur ein Umwegfaktor von 1,1, was bei einer kürzesten Fahrzeit von 20 Minuten einer realen Fahrzeit von 22 Minuten entspricht.

■ **Batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge mit eingeschränkter Reichweite können erfolgreich für einen Sammelverkehr im ländlichen Raum eingesetzt werden.**

Die Effizienz des Flotteneinsatzes bei batterieelektrischen Fahrzeugen mit einer eingeschränkten Reichweite von 350 km und einer Ladepause von etwa einer Stunde fällt nur geringfügig schlechter aus als bei Fahrzeugen mit den längeren Reichweiten eines Verbrennungsmotors. Durch eine ange-

passte Disposition könnte ein Teil dieser Differenz wieder reduziert werden.

■ **Sonntags kann der Betrieb mit etwa einem Viertel der Fahrzeugflotte effizient umgesetzt werden.**

Durch die reduzierte Wegezanzahl an Sonntagen (hier etwa zehn Prozent der Wege eines Werktags) muss nur etwa ein Viertel der Fahrzeugflotte eingesetzt werden. Für einen Teil der Flotte könnten so notwendige Betriebspausen eingeplant werden, um zum Beispiel umfangreichere Wartungen oder Reinigungen durchzuführen, wobei kurze Reinigungen voraussichtlich täglich einzuplanen sind.

■ **Ein autonomer Sammelverkehr kann zu vertretbaren Kosten umgesetzt werden.**

Autonome Sammelverkehre im ländlichen Raum können für jeden erschwinglich sein, besonders, wenn sie als Ersatz des klassischen ÖPNV gesehen und wie dieser heute subventioniert werden. Basierend auf der Kostenabschätzung von Sinner, Brawand und Weidmann [10] kann davon ausgegangen werden, dass mit 0,16 €/km bis 0,37 €/km unsubventioniertem Endnutzerpreis Mobilität für die meisten bezahlbar ist.

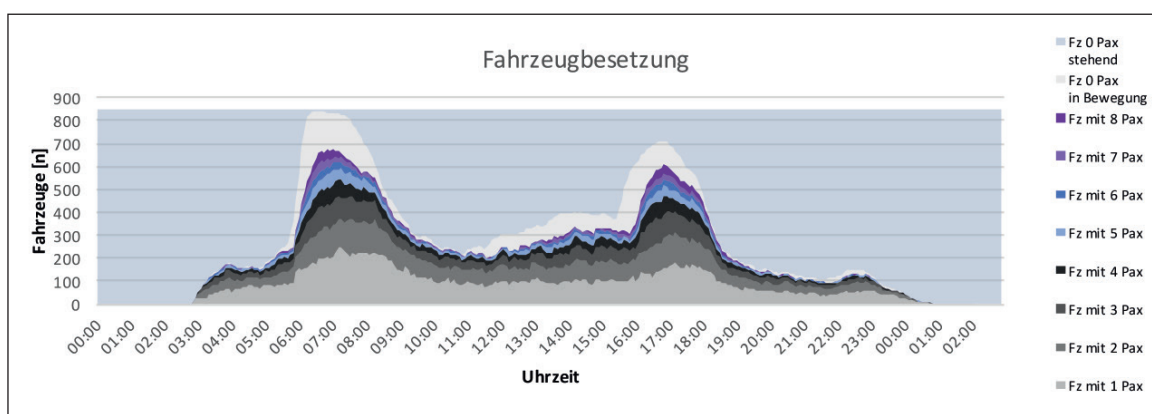


Abb. 9: Fahrzeugbesetzung achtsitziger Fahrzeuge im Tagesverlauf (Flottengröße 850 Fahrzeuge, Nachfrageniveau 35 Prozent der 125.000 Wege/Tag)

Fazit

Ein Sammelverkehrsangebot mit autonomen Fahrzeugen ist auch im ländlichen Raum bereits bei relativ niedrigem Nachfrageniveau mit gutem Bündelungspotenzial umsetzbar und nimmt mit steigendem Nachfrageniveau an Effizienz zu. Durch die hohe Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen und die langen täglichen Betriebsstunden ist ein traditioneller Betrieb mit Fahrern jedoch wirtschaftlich auszuschließen. Durch die Bündelung von Fahrten erfolgt eine erhöhte Auslastung der Fahrzeuge. Bei durchschnittlich 2 bis 2,5 Personen/Fahrzeug kann ein kilometerbasierter Tarif (je Fahrt Abrechnung der kürzesten Quelle-Ziel-Verbindung) wirtschaftlich für Anbieter und Nutzer von Interesse sein. Zwischen 130 und 200 Prozent der gefahrenen Kilometer könnten dabei abgerechnet werden. Für die Mobilität im ländlichen Raum ohne eigenen Pkw eröffnen sich neue, sinnvoll umsetzbare Möglichkeiten, die nicht nur das heutige Maß an ÖPNV-Versorgung abdecken, sondern die Qualität des Mobilitätsangebots deutlich verbessern können.

Literatur/Anmerkungen

[1] Statistisches Bundesamt. 2016. Statistisches Jahrbuch Deutschland und Internationales 2016. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

[2] Crößmann, Anja; Schüller, Frank. 2016. Arbeitsmarkt und Verdienste: Arbeitsmarkt. In: Statistisches Bundesamt (Destatis) und Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB) (Hrsg.): Datenreport 2016: Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland. Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung. S. 125–138.

[3] Bertonecello, Michele; Wee, Dominik. 2015. Ten ways autonomous driving could redefine the automotive world. McKinsey and Company

[4] Friedrich, Markus; Hartl, Maximilian. 2016. Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs (Megafon). Stuttgart: Universität Stuttgart Institut für Straßen- und Verkehrswesen Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik.

[5] ITF International Transport Forum (Hrsg.). 2015. A New Paradigm for Urban Mobility: How Fleets of Shared Vehicles Can End the Car Dependency of Cities. Corporate Partnership Board Report.

[6] ITF International Transport Forum. 2016 (Hrsg.). Shared Mobility: Innovation for Liveable Cities. Corporate Partnership Board Report.

[7] Bertelsmann Stiftung. 2017. Demographiebericht: Daten – Prognosen Kronach (im Landkreis Kronach). Gütersloh: Bertelsmann Stiftung. <http://www.wegweiser-kommune.de/kommunen/kronach-kc> zuletzt geprüft am: 03.02.2018.

[8] Kohoutek, Sven. 2018. Ansätze zur Smart Mobility. In: DER NAHVERKEHR (3/2018) 30–39.

[9] OSM, OpenStreetMap® verteilte Zugriffe über 2017

[10] Sinner, Marc; Brawand, Sergio; Weidmann, Ulrich. 2017. Große Chancen durch Automatisierung im ÖPNV. In: DER NAHVERKEHR (10/2017) 30–36.

Zusammenfassung/Summary

Sammelverkehr mit autonomen Fahrzeugen im ländlichen Raum

Auswirkungen des demografischen Wandels zeigen sich inzwischen nicht nur in ländlichen Räumen, sondern zunehmend auch in Randbereichen von Ballungsräumen. Vor allem im ländlichen Raum stellen aktuelle demografische und gesellschaftliche Entwicklungen den liniengebundenen ÖPNV jedoch vor große Herausforderungen. Als eine Lösungsmöglichkeit für diese Problemstellung gerät insbesondere der Einsatz autonomer Fahrzeuge in bedarfsabhängigen Mobilitätsangeboten zunehmend in den Fokus. Diese Studie weist nach, dass auch mit vergleichsweise geringer Verkehrsnachfrage in Raumstrukturen mit weiten Wegen ein effizienter Betrieb von flexiblen Sammelverkehren mit kleinen Fahrzeugen möglich ist. Sammelverkehr mit autonomen Fahrzeugen ist im ländlichen Raum mit gutem Bündelungspotenzial umsetzbar und nimmt mit steigender Nachfrage an Effizienz zu. Dadurch besteht das Potenzial, Mobilität im ländlichen Raum nachhaltig zu verändern.

Ride Pooling with Autonomous Vehicles in Rural Areas

The impacts of demographic change become apparent, not only in rural areas but outskirts of urban agglomerations as well. However, especially in rural areas current demographic and societal changes do pose a significant challenge to line based public transport. One solution being discussed is the implementation of autonomous vehicles in demand-oriented mobility services. This study establishes the feasibility of such services being implemented in rural areas with low population density and long distances to cover. Ride pooling with autonomous vehicles can be realised with reasonable pooling potential in rural areas. Efficiency increases with increasing customer base. Thus, bearing the potential of changing mobility in rural areas in the long term.

ANZEIGE

Digitalisierung im ÖPNV

Innovation macht mobil!

Mit effizienten Lösungen unterstützen wir unsere Kunden bei der Gestaltung der Mobilität von morgen – und das schon seit über 20 Jahren.

Wir kommen aus der Praxis und denken voraus, immer mit dem Fahrgast im Fokus. So begleitet Sie die rms in die digitale Zukunft des ÖPNV.

Sprechen Sie uns an! Von Frankfurt und Berlin aus sind wir in ganz Deutschland für Sie da.

www.rms-consult.de

rms
Rhein Main Service

20 Jahre
Planung
Beratung
Service

Ansichtsexemplar bereitgestellt über **Bus&Bahn**