

# Wie effizient kann On-Demand-Verkehr sein – Eine Untersuchung mittels Betriebssimulation

Benedikt Scheier, M.Sc., Braunschweig; Malte Wolf, M.A., Leipzig

On-Demand-Verkehre sind flexible, bedarfsorientierte Verkehrsangebote im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV). Das fehlende attraktive ÖPNV-Angebot im ländlichen Raum hat eine hohe Nutzung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) zur Folge. On-Demand-Verkehre werden als ein Lösungsbaustein gesehen, den ÖPNV in schwach nachgefragten Räumen und/oder Zeiten zu stärken. Nach der Novellierung des Personenbeförderungsgesetzes haben die Aufgabenträger mit dem Linienbedarfsverkehr nach §44 die Möglichkeit On-Demand-Verkehre nach ausdrücklichen Regelungen und Sozialstandards einzusetzen [1]. Laut des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) findet aktuell ein Hochlauf von On-Demand-Verkehren statt. Die Anzahl von Verkehrsprojekten dieser Art liegt bei über 80 [2]. Reisende erhoffen sich von On-Demand-Verkehren geringere Reisezeiten und höhere Verfügbarkeit gegenüber des Linienverkehrs und geringere Kosten als Taxi/Mietwagen. Aufgabenträger und Betreiber haben die Erwartung, dass der eingesetzte Verkehr einen hohen Kostendeckungsgrad erreicht und der On-Demand-

Verkehr auch gerade disperse Räume an das ÖV-System anbindet, welches über die Daseinsvorsorge-Funktion hinausgeht. Über ad-hoc gebündelte Fahrten mittels eines Dispositionsalgorithmus soll ein hoher Besetzungsgrad bei hoher Verfügbarkeit und Flexibilität erreicht werden. Dabei stehen eine geringe Reisezeit durch möglichst geringe Umwege im Zielkonflikt hohe Besetzungsgrade mittels starker Fahrtenbündelung zu erreichen [3].

## Effizienzindikatoren

Die Effizienz eines Systems, als Verhältnis von Nutzen zu Aufwand, ist geeignet, um den betriebenen On-Demand-Verkehr unmittelbar mit anderen Verkehrsträgern wie MIV, Taxi und Mietwagen vergleichen zu können. Der Nutzen wird in der erbrachten Verkehrsleistung in Personenkilometern (Pkm) gemessen; der Aufwand in den dafür benötigten Fahrzeugkilometern (Fzg-km). Aufgrund der Besonderheit der Fahrtenbündelung und damit einherzugehenden Umwegen werden zwei Effizienzindikatoren herangezogen [4]. Die betriebliche Effizienz greift die gefahrenen Personen-

kilometer auf und wird durch die gesamten Fahrzeugkilometer aller eingesetzten Fahrzeuge geteilt. Die betriebliche Effizienz wird oftmals auch als Besetzungsgrad gekennzeichnet. Die Systemeffizienz hingegen bezieht sich nur auf die tatsächlich vom Fahrgast gebuchten Personenkilometer, also der direkte Weg von Start- zu Zielhaltestelle. Diese dividiert durch die gesamten Fahrzeugkilometer ergeben die Systemeffizienz. Der Unterschied der beiden Effizienzen ist der gefahrene Umweg, der in den meisten Fällen unvermeidbar ist, wenn verschiedene Fahrtenanfragen zu einer Fahrt, wenigstens über eine Teilstrecke, gebündelt werden. Da dieser einen großen Einfluss auf die betriebliche Effizienz hat, wird die Systemeffizienz als aussagekräftige Kennzahl gewählt, jedenfalls wenn ein Vergleich zu MIV, Taxi und Mietwagen angestrebt wird. Bei der Entwicklung und Optimierung von Dispositionsalgorithmen sollte die Systemeffizienz herangezogen werden, um die gefahrenen Umwege durch Fahrtenbündelung minimieren zu können.

## Methode und Ziel der Untersuchung

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde anhand von zwei der Realität angelehnten Fallbeispielen die Auswirkung von Nachfrage, Bediengebiet und Angebot (zum Beispiel Anzahl der Haltestellen) auf die Effizienzindikatoren und Reisezeit untersucht [5]. Dabei wurde die Nachfrage soweit verändert, dass modellbasiert die maximale Effizienz (lokales Optimum) ermittelt werden konnte.

Mit Hilfe der mikroskopischen Simulationssoftware SUMO (Simulation of Urban Mobility) können Reisende und Fahrzeuge als Agenten in einem Verkehrsnetz modelliert, simuliert und deren intermodale Reisekette beziehungsweise deren Betrieb ausgewertet werden [7]. Somit ist es möglich, Inputparameter zu verändern und



Abb. 1: Modellregion „kleinstädtischer Raum“; linker Teil: schematische Darstellung; rechter Teil: SUMO.

Grafik: links [6], rechts DLR

die Auswirkung auf das Ergebnis strukturiert zu untersuchen. Zur Simulation der On-Demand-Verkehre und Disposition der Fahrtanfragen auch zwecks Fahrtenbündelung wird ein vom DLR entwickelter Dispositionsalgorithmus verwendet [8].

Anhand von zwei Modellregionen, welche an Regionen des flexo-Systems des Regionalverbands Großraum Braunschweig angelehnt wurden, wurde die Effizienz eines On-Demand-Systems im städtischen und eines im ländlichen Raum analysiert und verglichen. Der flexo-Raum „Salzgitter-Bad“ ist im Süden des Verbandsgebietes verortet. Dieser wird folgend auch als „kleinstädtischer Raum“ bezeichnet. Er erstreckt sich über die Stadt „Salzgitter-Bad“ bis zum wichtigen Knotenpunkt für den ÖPNV, Salzgitter-Ringelheim. Die Reisenden können an den bestehenden Haltestellen und an extra für den flexo-Verkehr eingerichteten Halteorten zu- und aussteigen. Der Bahnhof in der westlich gelegenen Stadt und die Hochschule im Norden sind neben dem gesamten Stadtgebiet von Salzgitter-Bad an das System angebunden. Insgesamt gibt es mehr als 100 Start- und Zielhaltestellen auf einer Fläche von 15 km<sup>2</sup> im Untersuchungsgebiet (Abb. 1).

Das flexo-Gebiet von Söhlde im Norden bis Baddeckenstedt im Süden ist ein ländlich geprägter Raum. Insgesamt umschließt er 13 Ortschaften und zwei Bahnhöfe. Die Bahnhöfe als wichtige Knotenpunkte befinden sich in Baddeckenstedt im Süden und im Norden des Gebiets, welches sich über eine Fläche von mehr als 40 km<sup>2</sup> erstreckt. Insgesamt sind 55 flexo-Stopps zusätzlich der vorhandenen Haltestellen als Ein- oder Ausstiegspunkte für Fahrgäste ausgewiesen (Abb. 2).

Das Straßennetz und die bereits vorhandenen Haltestellen beider Modellregionen wurden mittels Daten von OpenStreet-Map in SUMO fahrspurgenau modelliert. Die zusätzlichen flexo-Halteorte wurden manuell in die Simulationsumgebung eingefügt. Es wurden jeweils Simulationen über drei Stunden mit veränderten Eingangsparametern durchgeführt. Die Fahrzeuge starten an einem zentralen Ort. Hat ein Fahrzeug eine Fahrt mit Reisenden beendet, bleibt das Fahrzeug an der Haltestelle stehen, bis es vom Dispositionsalgorithmus eine neue Fahrt zugewiesen bekommt. Die Reisenden sind über die drei Simulationsstunden gleich verteilt. Die Quelle-Ziel-Beziehung ist angelehnt an die bereits vorhandene Nachfrage der bei-



### Zum Autor

**Benedikt Scheier, M.Sc.** ist seit 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Design und Bewertung neuer Mobilitätslösungen am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik. Er führt Wirkungsanalysen und Bewertungen von neuen Verkehrstechnologien und -maßnahmen durch. Scheier ist Wirtschafts- und Verkehringenieur.



### Zum Autor

**Malte Wolf, M.A.** ist seit 2023 Verkehrsplaner für innovative Mobilitätskonzepte bei der DB Regio Bus Ost GmbH. Sein Studium zum Verkehrssystemingenieur an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften hat er 2022 abgeschlossen.

den flexo-Verkehre. Die Reisenden-Agenten der Simulation starten an einer Kante des Netzes, bewegen sich zu Fuß zur örtlich nächstgelegenen Haltestelle beziehungsweise -ort und rufen sich ein Fahrzeug. Die Zeit zwischen Fahrtanfrage und Abholen an der Haltestelle wird als Vorbuchungszeit bezeichnet. Praktisch kann der Reisende die Fahrt vom Startort aus buchen und zeitgenau an der Haltestelle eintreffen. Alle 30 Sekunden sucht der Dispositionsalgorithmus eine optimale Zuordnung von Fahrzeugen zu Fahrtanfragen und berücksichtigt dabei Parameter wie maximale Vorbuchungszeit und Umwegfaktor. Nach Absetzen an der Zielhaltestelle läuft der Reisende zu seiner Zielkante. Nach Durchlaufen der Simulation werden verschiedene Indikatoren ausgewertet. Die Vorbuchungszeit, Reisezeit, be-

triebliche Effizienz und die Systemeffizienz sind hier von Interesse.

## Ergebnisse

Die Abbildung 3 zeigt die Systemeffizienz und die betriebliche Effizienz beider Modellregionen in Abhängigkeit der Verkehrsnachfrage. Wird die Nachfrage verändert, während die Fahrzeuganzahl und die Vorgabe des maximalen Umwegfaktors gleichbleiben, so steigen die Effizienzen bei steigender Nachfrage an. Dies passiert so lange, bis die Nachfrage nicht mehr von den eingesetzten Fahrzeugen abgewickelt werden kann. Danach werden Fahrten abgelehnt und weitere Fahrzeuge müssten hinzugefügt werden. Somit laufen die Effizienzen einem maximalen Wert entgegen.

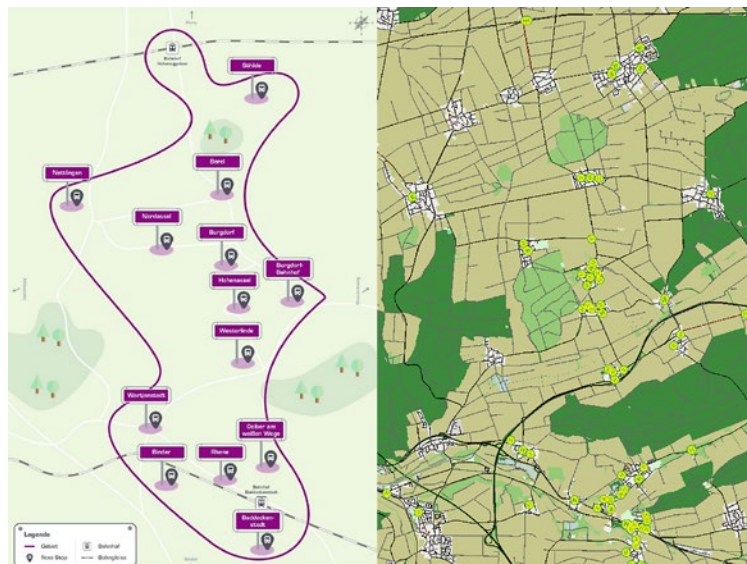


Abb. 2: Modellregion „ländlicher Raum“; linker Teil: schematische Darstellung; rechter Teil: SUMO. Grafik: links [9], rechts DLR

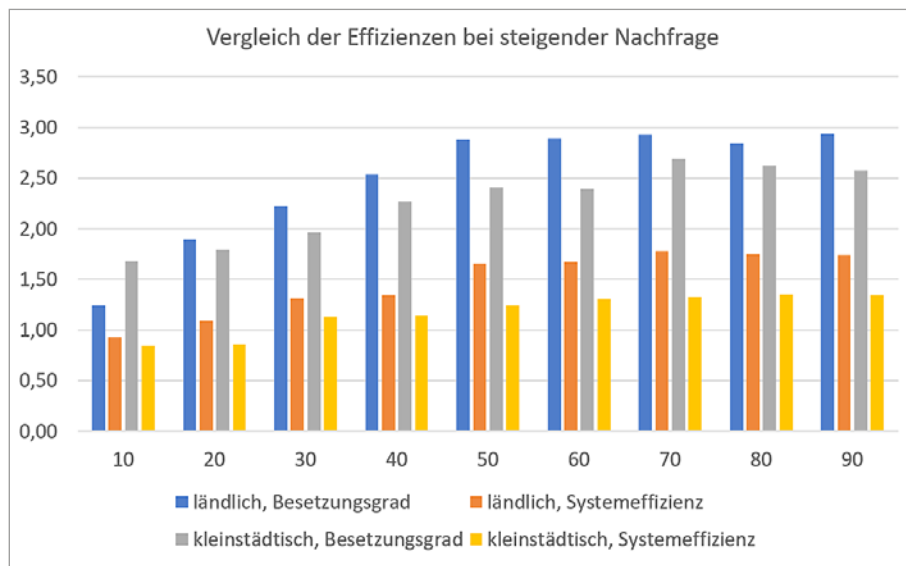


Abb. 3: Besetzungsgrad und Systemeffizienz in Abhängigkeit veränderter Nachfrage. Grafik: DLR

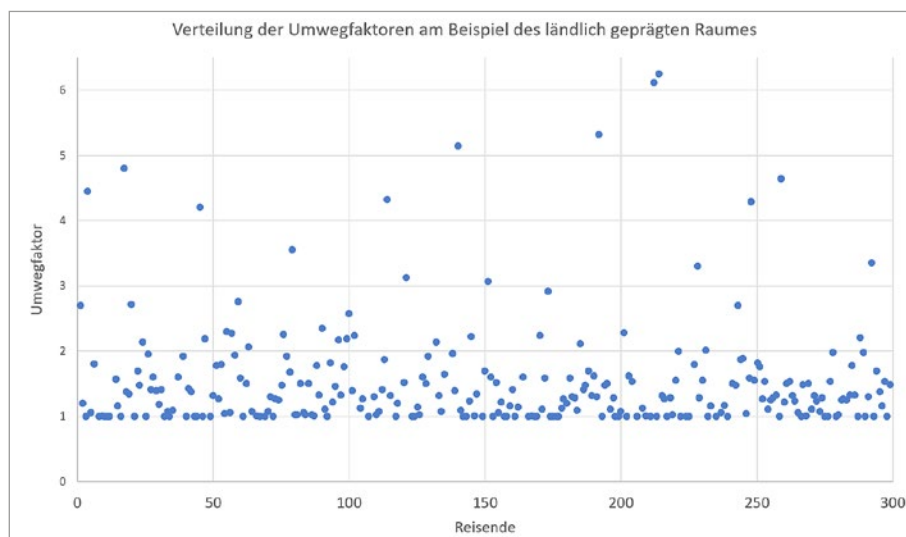


Abb. 4: Verteilung der Umwegfaktoren am Beispiel des ländlich geprägten Raumes. Grafik: [5]

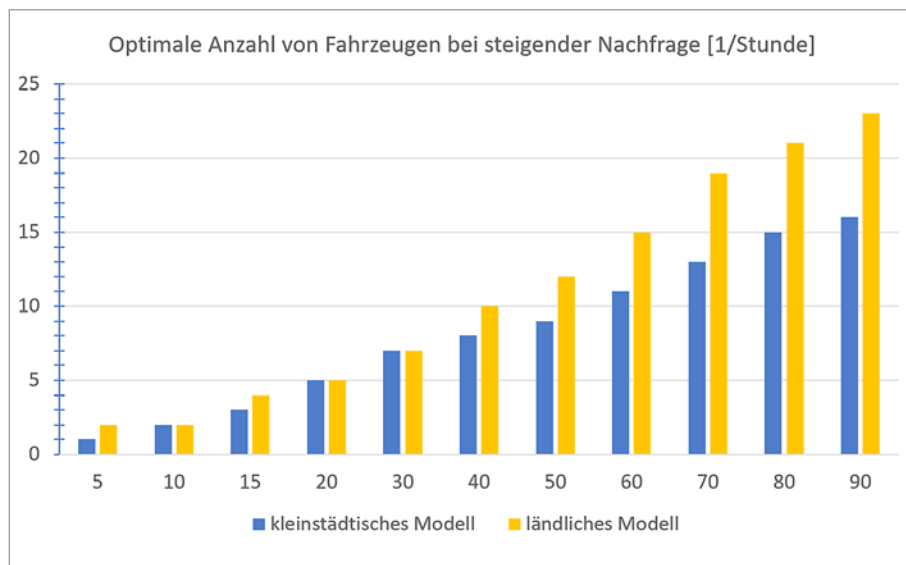


Abb. 5: Benötigte Fahrzeuge in Abhängigkeit variierender Nachfrage für das kleinstädtische und das ländlich geprägte Modell. Grafik: DLR

Die Systemeffizienz steigt in der ländlich geprägten Region auf bis zu 1,9. Ab einer Nachfrage von 70 Anfragen je Stunde befindet sich die Effizienz im Bereich 1,7–1,8. Die betriebliche Effizienz befindet sich ab einer Nachfrage von 50 bei knapp 3. Dies bedeutet einen Umwegfaktor von 1,5–1,7. Da bei der Verkehrsnachfrage keine Gruppenanfragen berücksichtigt sind, kann unterstellt werden, dass der MIV eine Systemeffizienz von 1,0 hat (Fahrerin transportiert sich selbst). Taxi und Mietwagen liegen aufgrund des Leerfahrtanteils darunter. In der ländlich geprägten Region wird eine Systemeffizienz über 1,0 ab einer Nachfrage von 20 Anfragen je Stunde erreicht.

Für eine Systemeffizienz über 1,0 benötigt der kleinstädtisch geprägte Raum eine Nachfrage von 30 Fahrten je Stunde. Die höchsten Werte bis zu 1,4 werden ab einer Nachfrage von 60 erreicht. Der Umwegfaktor im Bereich der hohen Effizienzen liegt bei 1,8–1,9. Der zeitliche Umwegfaktor liegt bei 2,5. Im Vergleich zu dem ländlich geprägten Modell, bei dem der zeitliche Umwegfaktor bei circa 2,0 liegt, ist der zeitliche Umwegfaktor im Verhältnis zum Umwegfaktor (Weg) höher. Gezielte Simulationen haben ergeben, dass dies an den zusätzlichen Halteorten in den vielen Wohngebieten mit Geschwindigkeitsbeschränkungen liegt.

Im hohen Effizienzbereich liegen in der ländlich geprägten Region die durchschnittliche Reisezeit bei 19 Minuten und die Vorbuchungszeit bei 13–15 Minuten. Im kleinstädtisch geprägten Modell liegen die durchschnittliche Reisezeit bei 15 Minuten und die Vorbuchungszeit bei 14 Minuten. Es zeigt sich, dass die ländliche Region bessere Effizienzen erreichen kann, wobei die Reisezeiten aufgrund der kleineren Raumausdehnung in der städtischen Region geringer sind. Die Vorbuchungszeiten sind ähnlich. Zu vermuten ist, dass der Richtungsbandcharakter und die höheren Entfernungen positiven Einfluss auf die Systemeffizienzen haben.

## Umwegfaktor

Der durchschnittliche Umwegfaktor setzt sich aus dem Verhältnis von direktem zu tatsächlichem Weg aller Fahrgäste zusammen. Wie eingangs erwähnt, steht eine hohe Fahrtenbündelung zur Erreichung einer hohen Effizienz im Zielkonflikt zu einer möglichst gewünschten geringen Reisezeit. Wie sich am Beispiel des ländlich geprägten Raumes in Abbildung 5 zeigt,



ist die Verteilung der Umwege aller Reisenden ungleich. 93 Prozent der Reisenden müssen einen Umwegfaktor unter 2 in Kauf nehmen, 5,5 Prozent der Reisenden einen Umwegfaktor von 2 bis 3 und 1,6 Prozent einen Faktor über 3.

## Fahrzeuganzahl und Fazit

Für den Betreiber gilt es zu ermitteln, wie hoch die optimale Fahrzeuganzahl in Abhängigkeit der vorhandenen Nachfrage ist, das heißt es müssen möglichst alle Fahrzeuge verwendet werden, dabei aber auch alle Fahrtanfragen unter den gesetzten Angebotsqualitätsparametern bedient werden können. Die Abbildung 5 zeigt die benötigte Fahrzeuganzahl für die hier untersuchten Modelle des kleinstädtischen und des ländlich geprägten Raumes. Besonders bei steigender Nachfrage und auf-

grund des größeren Raumes benötigt der ländlich geprägte Raum mehr Fahrzeuge. Eine Systemeffizienz über 1,0 wird ab einer Nachfrage von 20 erreicht. Dies bedeutet, dass mindestens fünf Fahrzeuge eingesetzt werden sollten. Um die hohen Systemeffizienzbereiche von 1,8 (ländliches Modell) beziehungsweise 1,4 (kleinstädtisches Modell) zu erreichen, wird eine Nachfrage von mindestens 50 Fahrten je Stunde benötigt. Dann werden Effizienzen erreicht, die sich weit über dem des MIV und insbesondere auch des Taxis/Mietwagens befinden.

## Literatur/Anmerkungen

- [1] Lenz, C., Jürschnick, C.: Sozialstandards bei On-Demand-Verkehren – wie geht das? in DER NAHVERKEHR 4/2022, S. 61 – 63.
- [2] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): On-Demand im ÖPNV, Branchenumfrage; [www.vdv.de/ondemandumfrage22.aspx](http://www.vdv.de/ondemandumfrage22.aspx); abgerufen am 15.03.2023 um 10:30 Uhr.
- [3] Scheier, B. et al.: Bedarfsorientierter ÖPNV im ländlichen Raum – Simulationsstudie und Potentialanalyse. Vortrag auf Projektabschlussveranstaltung DLR-Projekt MOVEMENT, 19. Mai 2022, Braunschweig; <https://elib.dlr.de/186870/>.
- [4] Liebchen, C. et al.: Ridepooling-Effizienz messbar machen. Betriebliche Effizienzgrößen für Ridepooling-Systeme. In: DER NAHVERKEHR 38. Jahrgang, 2020, Heft 9, S. 18 – 21.
- [5] Wolf, M.: Simulationsbasierte Sensitivitätsanalyse anhand von Key-Performance-Indikatoren im On-Demand Verkehr; Masterarbeit, Ostfalia Hochschule, 2022; <https://elib.dlr.de/191853/>.
- [6] Regionalverband Großraum Braunschweig: flexo in Salzgitter-Bad; [www.flexo-bus.de/salzgitter-bad/](http://www.flexo-bus.de/salzgitter-bad/); abgerufen am 15.03.2023 um 10:30 Uhr.
- [7] Pablo, A. et al.: Microscopic Traffic Simulation using SUMO. In: IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), 2018; <https://elib.dlr.de/127994/>.
- [8] Armellini, M.: A Tool for Simulating Demand Responsive Transport Systems in SUMO. In: 7th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, MT-ITS 2021. 7th International IEEE Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, 16.–17. Juni 2021; <https://elib.dlr.de/141256/>.
- [9] Regionalverband Großraum Braunschweig: flexo in Hoheneggelsen/Baddeckenstedt; [www.flexo-bus.de/hoheneggelsen-baddeckenstedt/](http://www.flexo-bus.de/hoheneggelsen-baddeckenstedt/); abgerufen am 08.03.2023 um 10:30 Uhr.

## Zusammenfassung/Summary

### Wie effizient kann On-Demand-Verkehr sein – Eine Untersuchung mittels Betriebssimulation

Die ÖPNV-Branche und die Reisenden haben hohe Erwartungen an den On-Demand-Verkehr. Er soll die Angebotsqualität aber auch den Kostendeckungsgrad gerade in schwach nachgefragten ländlichen Räumen deutlich erhöhen. Die Angebotsqualität steigt, da Fahrten in einem bestimmten Gebiet nicht durch den Linienecharakter eingeschränkt sind. Der Kostendeckungsgrad soll erhöht werden durch das optimale Bündeln von Fahrtanfragen. Dabei muss ein Kompromiss zwischen hoher Fahrtenbündelung – und damit auch höhere Umwege und Reisezeiten – und einem möglichst hohen Besetzungsgrad gefunden werden. Im Vergleich zum MIV und dem Taxi/Mietwagen sollte anstatt des Besetzungsgrades die Systemeffizienz zur Evaluation und Optimierung des Verkehrs herangezogen werden, da in dieser die gefahrenen Umwege nicht enthalten sind. Mit der Betriebssimulationssoftware SUMO wurde die Effizienz von On-Demand-Verkehr in einem ländlichen Modell und in einem kleinstädtischen Modell ermittelt. Im ländlichen Modell wurde mit 1,8 eine höhere Systemeffizienz erreicht als im kleinstädtischen Modell (1,4). Eine Nachfrage von 20 beziehungsweise 30 Fahrten je Stunde wurde benötigt, um eine Systemeffizienz über 1,0 erreichen zu können.

### How efficient can on-demand transport be – An investigation using operational simulation

The public transport sector and passengers have high expectations of Demand-Responsive Transport (DRT). It is expected to significantly increase the quality of services but also the degree of cost recovery, especially in rural areas with low demand. The quality of service increases because journeys in a certain area are not restricted by the route character. The degree of cost recovery is to be increased through the optimal bundling of travel requests. A trade-off must be found between high trip bundling – and thus also higher detours and travel times – and the highest possible occupancy rate. Compared to private transport and taxis/hired cars, the system efficiency should be used instead of the occupancy rate for the evaluation and optimization of DRT, as this does not include the detours. The simulation tool SUMO was used to determine the efficiency of DRT in a rural model and in a small town model. The rural model achieved a higher system efficiency of 1.8 than the small town model (1.4). A demand of 20 or 30 trips per hour was needed to achieve a system efficiency above 1.0.

ANZEIGE



**PPS/EDV**  
Planung  
Programmierung  
Schulung GmbH

**...lieber doch von Tür zu Tür?**  
Buchungs- und Dispositionssystem für Land und Stadt

- Buchungen sowohl via App als auch telefonisch
- automatische Fahrtwunschbündelung
- sowohl haustür- als auch haltestellenbasiert
- intermodale Buchungsplattform – vollständige Integration von Linienfahrplänen

[www.pps-edv.de](http://www.pps-edv.de)