

Abbildung von Klimaschutzmaßnahmen in Verkehrsnachfragemodellen

Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

Lehrstuhl Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 7, D-70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711/68582480
E-Mail: markus.friedrich@isv.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. Kea Seelhorst

Lehrstuhl Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 7, D-70569 Stuttgart
E-Mail: kea.seelhorst@isv.uni-stuttgart.de

Diesem Beitrag liegen Teile des im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr unter der FoPS-Projekt-Nr. VB710004 durchgeführten Forschungsvorhabens „Abbildung von Klimaschutzmaßnahmen in Verkehrsnachfragemodellen“ zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt des Beitrags liegt allein bei den Autoren.

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit folgenden Projektpartnern bearbeitet:

- Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz, Sascha Klein, M.Sc.
INOVAPLAN GmbH, Karlsruhe
- Dr.-Ing. Juliane Pillat, Dr.-Ing. Nicolas Mellinger
PTV Transport Consult GmbH, Karlsruhe

Kurzfassung

Der Beitrag stellt drei Modellerweiterungen für Verkehrsnachfragemodelle vor, mit denen die Wirkungen von Klimaschutzmaßnahmen besser abgebildet werden können.

(1) Mobilitätswerkzeugwahl: Integration einer vorgelagerten Wahlstufe, um den Besitz von Pkw und ÖV-Zeitkarten nicht länger als statische Größe vorzugeben, sondern als maßnahmensensitive Entscheidung in makroskopischen wie auch mikroskopischen Verkehrsnachfragemodellen abzubilden.

(2) Präferenzänderungen: Abbildung veränderter Mobilitätspräferenzen durch Modifikation von Nutzenfunktionen.

(3) On-Demand-Angebote: Entwicklung von Verfahren zur räumlichen und zeitlichen Disaggregation von Verkehrsangebot und -nachfrage, um die Effekte von On-Demand-Angeboten abbilden zu können.

1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Mit den Klimazielen von Paris, den daraus abgeleiteten CO₂-Minderungszielen (KSG 2019) und dem Urteil des BVerfG zu Artikel 20a GG, dass die Bewahrung des Lebensraums für kommende Generationen bei allen Abwägungsentscheidungen zu berücksichtigen ist, ergeben sich neue Anforderungen an die Verkehrspolitik und die Verkehrsplanung. Aufgabe der kommunalen und regionalen Planung wird es sein, die Klimawirkungen von Instrumenten und Maßnahmen zu quantifizieren. Das betrifft sowohl Instrumente und Maßnahmen, die auf übergeordneter Ebene vorgegeben werden (z. B. CO₂-Preise, Förderung von E-Fahrzeugen), als auch kommunale Maßnahmen (z. B. Parkgebühren, Umweltzonen), deren Ausgestaltung in der Verantwortung der Kommunen liegt.

Ziel des vom BMV geförderten Forschungsvorhabens „Abbildung von Klimaschutzmaßnahmen in Verkehrsnachfragemodellen“ (Friedrich et al. 2026) war es, ausgewählte Methoden der Nachfragemodellierung für den Personenverkehr so weiterzuentwickeln, dass mit städtischen und regionalen Modellen die Klimawirkungen von Entwicklungen und Maßnahmen angemessen ermittelt und analysiert werden können. Bild 1 zeigt in Schwarz Entwicklungen und Maßnahmen, deren Wirkungen mit heute verfügbaren Verkehrsnachfragemodellen ermittelt werden können. Die Entwicklungen und Maßnahmen können im Planungsprozess zu Szenarien kombiniert werden, für die dann die Nachfragewirkungen mit dem Nachfragemodell abgeschätzt werden. Aus den Nachfragewirkungen ergeben sich schließlich Änderungen bei den CO₂-Emissionen. Grün dargestellt sind Entwicklungen und Maßnahmen, deren Wirkungen für die Untersuchung von Klimaschutzszenarien bedeutsam sind, die aber bisher in makroskopischen Nachfragemodellen nicht oder nur unzureichend abgebildet werden können. Das Forschungsvorhaben betrachtet Weiterentwicklungen in der Verkehrsnachfragemodellierung für vier Klassen von Entwicklungen und Maßnahmen.

1.1 Verkehrsmittelverfügbarkeit: Pkw-Beschaffungswahl, Zeitkartenbeschaffungswahl

Die Verkehrsmittelverfügbarkeit ist bisher eine exogene Eingangsgröße für ein Verkehrsnachfragemodell, die dann insbesondere die Ziel- und die Moduswahl beeinflusst. Die Verkehrsmittelverfügbarkeit von Pkw und ÖV-Zeitkarten soll über ein Mobilitätswerkzeugwahlmodell direkt in das Verkehrsnachfragemodell integriert werden. Das Modell soll die Qualität des Verkehrsangebots am Wohnort berücksichtigen und auf Änderungen in der Angebotsqualität und bei den Preisen reagieren. Bei den Preisen sollen Fixkosten (Beschaffung Fahrzeug und Zeitkarte) und nutzungsabhängige Kosten (CO₂-Preise, Parkgebühren,) differenziert werden.

1.2 Präferenzänderungen

Verkehrsnachfragemodelle können Verhaltensänderungen infolge von Anpassungen am Verkehrsangebot oder demografischen Änderungen abbilden. Zukünftige Präferenzänderungen, z. B. wie Personen ihre Zeit bewerten, die Privatsphäre bei On-Demand-Angeboten wahrnehmen oder gesundheitliche Aspekte beim Radfahren gewichten, können dagegen nicht prognostiziert werden oder erfordern aufwendige Stated-Preference-Befragungen. Die Modellerweiterung soll eine normative Modellierung erlauben. Bei einer normativen Modellierung wird ein gewünschtes Ergebnis als Zielwert vorgegeben, z. B. ein angestrebter Modal-Split-Wert. Dabei wird auf die Formulierung konkreter Maßnahmen verzichtet oder es wird für eine Maßnahme eine erwartete Wirkung als Annahme vorgegeben. Ziel der normativen Modellierung ist es, die Abhängigkeiten zwischen den alternativen Modi bei der Moduswahl und ggf. auch bei der Zielwahl und der Routenwahl aufzuzeigen.

1.3 On-Demand-Angebote

Das Modell soll die Wirkungen eines Ridepooling-Angebots ermitteln, das in Teilräumen den Busverkehr ersetzt oder ergänzt. Es sollen die Wirkungen auf die Nachfrage, auf den Energie-

verbrauch und auf die Betriebskosten ermittelt werden. Das Modell soll in der Lage sein, mehrere Bedienegebiete zu unterscheiden. Es soll mit möglichst geringem Aufwand in vorhandene Modelle integriert werden können.

1.4 Abfahrtszeitwahl

Ridepooling-Angebote werden oft in Randzeiten als Ergänzung zum dort eingeschränkten Angebot des öffentlichen Verkehrs eingesetzt. Makroskopische Verkehrsnachfragemodelle ermitteln die Angebotsqualität typischerweise für einen gesamten Werktag und verwenden dabei durchschnittliche Tageskenngrößen für Fahrzeiten, Bedienungshäufigkeiten und Umsteigehäufigkeiten. Das führt dazu, dass im Modell eine ÖV-Nachfrage auch für Tageszeiten generiert wird, in denen kein öffentlicher Verkehr angeboten wird. Eventuelle Verbesserungen durch Ridepooling-Angebote in den Randzeiten werden so nicht sichtbar. Um die zeitlich differenzierte Nutzung realistisch abzubilden, ist es erforderlich, tageszeitspezifische Kenngrößenmatrizen für unterschiedliche Zeiträume in die Moduswahl zu integrieren.

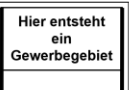
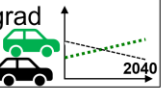
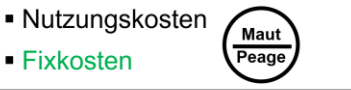
Entwicklungen	Maßnahmen	Szenarien
- Demographie - Präferenzen 	Verkehrswege 	= Menge von Annahmen zu - Entwicklungen - Maßnahmen
Siedlungsstruktur 	- ÖV-Angebot - On-Demand 	Trendszenario
- Motorisierungsgrad - Fahrzeugflotte 	Beeinflussung Pkw-Besitz & ÖV-Zeitkarte 	Szenario Maßnahmen M1
Energiepreise 	- Nutzungskosten - Fixkosten 	Szenario Maßnahmen M2
Technologie 	Ordnungspolitik 	Klimaschutzszenario
- Schwarz: typische Entwicklungen und Maßnahmen, deren Wirkungen mit vorhandenen Verkehrsnachfragemodellen ermittelt werden können - grün: Entwicklungen und Maßnahmen, deren Wirkungen für die Untersuchung von Klimaschutzszenarien bedeutsam sind und eine Weiterentwicklung von Verkehrsnachfragemodellen erfordern.		

Bild 1: Entwicklungen und Maßnahmen, deren Wirkungen mit Verkehrsnachfragemodellen ermittelt werden können, und notwendige Erweiterungen für Klimaschutzszenarien.

2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise im Projekt umfasst die folgenden Schritte:

- Stand des Wissens zur Modellierung von Klimaschutzmaßnahmen:
Mithilfe von Steckbriefen wird der Stand des Wissens bei der Modellierung von Klimaschutzmaßnahmen für die vier im Projekt betrachteten Entwicklungen und Maßnahmen dokumentiert.
- Spezifikationen für eine Weiterentwicklung der Modelle:
Für jede der vier Maßnahmenklassen wird eine Spezifikation entwickelt, die Grundlage für die Implementierung in einem makroskopischen Nachfragemodell ist.

- **Auswahl von Untersuchungsräumen:**
Die entwickelten Spezifikationen werden exemplarisch in vorhandene Verkehrsnachfragemodelle implementiert (siehe Tabelle 1). Dazu werden die Verkehrsnachfragemodelle Ortenaukreis, Schwabach und Stuttgart genutzt. Zusätzlich steht ein Demo-Nachfragemodell für einen vereinfachten Untersuchungsraum Erding zur Verfügung, das mit allen Implementierungen ohne Einschränkungen an Dritte weitergegeben werden kann. Das Demo-Modell mit den implementierten Spezifikationen ist unter <https://doi.org/10.18419/DARUS-5955> zu finden. Die Implementierung erfolgt mit PTV Visum.
- **Erstellung eines Modellhandbuchs:**
Für das Demo-Nachfragemodell wird ein Modellhandbuch bereitgestellt. Hier sind die Implementierungen der Modellerweiterungen dokumentiert.
- **Erstellen eines Leitfadens:**
Die Ergebnisse des Projekts sollen perspektivisch in das FGSV-Regelwerk übernommen werden. Dazu wird ein Leitfaden bereitgestellt, der Textvorschläge für eine Übernahme in die „Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen für den Personenverkehr: EVNM-PV“ (FGSV 2022) enthält.

Modell/Untersuchungsraum	Modell-Typ	Zellen	Analysejahr	Kosten für alle Modi
Ortenaukreis	Aktivitätenketten	1.000	2021	Ja
Schwabach	Aktivitätenpaare	400	2017	Ja
Region Stuttgart	Aktivitätenketten	1.000	2010/2015	Ja
Demo Erding	Aktivitätenketten	130	-	Ja

Tabelle 1: Nachfragemodelle und Untersuchungsräume.

Im Folgenden werden drei der vier Modellerweiterungen zusammenfassend vorgestellt. Auf die Darstellung der Abfahrtszeitwahl wird aus Platzgründen verzichtet. Ausführliche Darstellungen finden sich im Projektbericht (Friedrich et al. 2026) und im Modellhandbuch (Seelhorst et al. 2026).

3 Verkehrsmittelverfügbarkeit und Mobilitätswerkzeugwahl

3.1 Grundlagen

Die Verkehrsmittelverfügbarkeit beschreibt, welche Mobilitätswerkzeuge einer Person oder einem Haushalt grundsätzlich zur Verfügung stehen. Von Bedeutung sind dabei insbesondere Pkw und ÖV-Zeitkarten. Die Verkehrsmittelverfügbarkeit beeinflusst Entscheidungen der Modus- oder Zielwahl. Viele Klimaschutzmaßnahmen sollen deshalb den Pkw- und ÖV-Zeitkartenbesitz direkt oder indirekt beeinflussen. Monetäre Maßnahmen (z. B. CO₂-Bepreisung, veränderte Parkkosten, ÖV-Tarifänderungen) oder Maßnahmen beim Verkehrsangebot (z. B. Ausbau ÖV-Angebot) beeinflussen die Moduswahl kurzfristig. Langfristig können die Maßnahmen dann auch auf die Beschaffung von Fahrzeugen oder Zeitkarten wirken. Dazu kommen Maßnahmen wie eine Zulassungssteuer, die direkt den Fahrzeugbesitz beeinflussen.

In heutigen Verkehrsnachfragemodellen werden der Pkw- und ÖV-Zeitkartenbesitz meist als externe Größe vorgegeben (z. B. „x % der Personen mit Pkw-Verfügbarkeit“). Die Abbildung der Moduswahlkosten erfolgt dann nur einstufig, sodass keine Unterscheidung zwischen einmaligen Beschaffungskosten (Fixkosten) und nutzungsabhängigen Kosten (variable Kosten) stattfindet. Beide Kostenarten gehen in diesem Fall als auf die Entfernung umgelegte Kosten in die Berechnung ein. Bild 2 (a) zeigt schematisch einen beispielhaften Verlauf der Moduswahlkosten in Abhängigkeit von der Entfernung zum gewählten Ziel. Veränderte variable (bzw.

marginale) Kosten, die sich aus langfristig getroffenen Beschaffungsentscheidungen ergeben, werden nicht explizit berücksichtigt. Um die Wirkung einer Beschaffungswahl in den Moduswahlkosten abzubilden, ist eine explizite Berücksichtigung von fixen und variablen Moduswahlkosten notwendig. Das erfordert eine getrennte, zweistufige Betrachtung, wie in Bild 2 (b) dargestellt (ARE 2015, Simon et al. 2021). Diese zweistufige Betrachtung kann mit einem makroskopischen oder einem mikroskopischen Ansatz erfolgen.

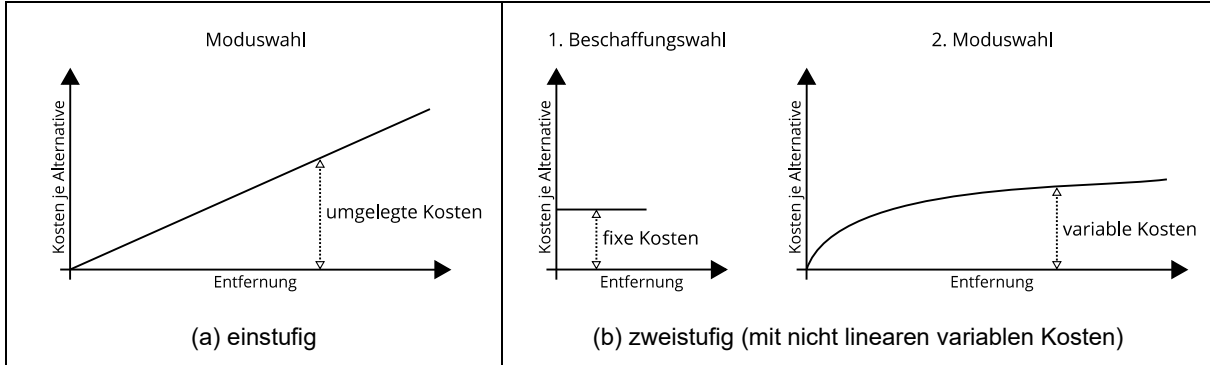


Bild 2: Zusammensetzung der Moduswahlkosten (Verläufe qualitativ) (Simon et al. 2021)

Beide Ansätze beschränken sich ausschließlich auf die Frage, ob ein Pkw bzw. eine ÖV-Zeitkarte zur Verfügung steht, und nicht darauf, welche Art von Pkw bzw. welche Art von ÖV-Zeitkarte. Eine eventuell erforderliche Differenzierung der Flottenzusammensetzung für den Pkw (Verbrenner, E-Antrieb) muss im Nachgang mit einer Setzung oder einem weiteren Wahlmodell erfolgen.

Makroskopischer Modellierungsansatz

Im makroskopischen Ansatz werden die Mobilitätswerkzeuge Pkw und ÖV-Zeitkarte kombiniert betrachtet. Daraus ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten vier Kombinationen von Mobilitätswerkzeugen, für die sich Personen entscheiden können.

Mobilitätswerkzeugkombination w	Pkw-Besitz	Zeitkartenbesitz
PJZJ	ja	ja
PJZN	ja	nein
PNZJ	nein	ja
PNZN	nein	nein

Tabelle 2: Wahlmöglichkeiten bei den Mobilitätswerkzeugen

Die allgemeine Formulierung der Mobilitätswerkzeugwahl erfolgt mit einem Logit-Modell. Dabei werden für jede Zelle i und ggf. jede Personengruppe p die Anteile derjenigen Personen berechnet, die über die jeweilige Mobilitätswerkzeugkombination w verfügen:

$$\text{Anteil } p_{ipw} = \frac{e^{v_{ipw}}}{\sum_w e^{v_{ipw}}}$$

Der Nutzen v für jede Mobilitätswerkzeugkombination w in der Zelle i und die Personengruppe p berücksichtigt folgende Komponenten:

- Fixkosten: Fixkosten für die Beschaffung einer Jahreszeitkarte und die Beschaffung eines Pkw. Die Fixkosten werden auf eine Ortsveränderung bezogen. Dafür benötigt das Modell als Eingangsgrößen Daten für die Pkw-Lebensdauer und die jährliche Zahl der Pkw-Fahrten bzw. der ÖV-Fahrten. Wird ein Pkw nicht nur im Untersuchungsraum genutzt, sondern

auch für Fahrten im Fernverkehr (z. B. Urlaub), wird die Zahl der jährlichen Pkw-Fahrten erhöht, sodass die Kosten für eine Fahrt im Untersuchungsraum sinken.

- Erreichbarkeiten: Die Erreichbarkeit einer Zelle i nutzt die Ergebnisse der Moduswahl. Für jede Relation ij , jeden Modus m und jedes Aktivitätenpaar z (z. B. Wohnen – Arbeiten) liefert das Moduswahlmodell eine Bewertung der Angebotsqualität (z. B. Zeitaufwand). Diese relationsspezifischen Bewertungen werden mit dem Anziehungspotenzial der Zielzellen (z. B. Zahl der Wege zur Arbeit) j gewichtet zu einer zellenspezifischen Erreichbarkeit für jede Mobilitätswerkzeugkombination zusammengefasst.

Die Verfügbarkeit wird differenziert nach Aktivitätenpaaren im Modell implementiert, sodass eine Verknüpfung der Verfügbarkeit mit dem Wohnort möglich ist. Aus den Anteilen der vier Mobilitätswerkzeugkombinationen ergeben sich für jede Zelle i die Anteile der Personen, die für den Modus $m=Pkw$ bzw. den Modus $m=ÖV$ über die geeigneten Mobilitätswerkzeuge Pkw bzw. Zeitkarte verfügen:

Anteil Personen mit Mobilitätswerkzeug für Modus Pkw: $p_{ip,m=Pkw} = p_{ip,w=PJZJ} + p_{ip,w=PJZN}$

Anteil Personen mit Mobilitätswerkzeug für Modus ÖV: $p_{ip,m=ÖV} = p_{ip,w=PJZJ} + p_{ip,w=PNZJ}$

Diese Anteile werden als Verkehrszellenvektor im Modell hinterlegt. Die Nutzenfunktion der Moduswahl greift dann auf diesen Verkehrszellenvektor zu und berücksichtigt die Verfügbarkeit mit einem konstanten Nutzen für $\beta_{p,m}^0$, der in der Modellkalibration für jeden Modus m geschätzt und mit der zellenspezifischen Verfügbarkeit p_{ipm} am Wohnort i gewichtet wird. Zusätzlich gehen die Zeit t und die Kosten c ein. In einer einfachen linearen Nutzenfunktion kann das für einen Weg vom Wohnort i zu einem Zielort j so aussehen:

Nutzen Modus m für Personengruppe p : $v_{ijpm} = \beta_{pm}^0 \cdot p_{ipm} + \beta_{pm}^t \cdot t_{ijm} + \beta_{pm}^c \cdot c_{ijm}$

Die obige Formulierung ist eine vereinfachte Form eines Mobilitätswerkzeugwahlmodells. Es wird u. a. davon ausgegangen, dass die verfügbare Mobilitätswerkzeugkombination nur den Nutzen der Modi Pkw und ÖV beeinflusst. Sie kann aber auch auf den Nutzen der Modi Rad und Fuß wirken.

3.2 Mikroskopischer Modellierungsansatz

Der mikroskopische Modellierungsansatz ermittelt die Anteile der Personen mit Pkw- und Zeitkartenbesitz für jede Verkehrszelle i mit einem agentenbasierten Modell. Die anschließenden Modellstufen der Aktivitäten-, Ziel-, Modus- und Routenwahl erfolgen dann wieder im makroskopischen Modell.

Das agentenbasierte Modell bildet einzelne Personen mit den Eigenschaften der Person und des Haushalts ab (z. B. Geschlecht, Alter, Haushaltsgröße, Erwerbstätigkeit, ökonomischer Status, Haustyp, Urbanisierungsgrad, Entfernung der nächsten ÖV-Haltestelle). Aus diesen Eigenschaften ergibt sich dann der Pkw-Besitz bzw. der Zeitkartenbesitz. Ein agentenbasiertes Modell erfordert die Erstellung einer synthetischen Bevölkerung.

Hierfür kann die Open-Source-Software PopulationSim (2026) genutzt werden (alternativ (Falc 2026, Silo 2026)). Die Erstellung einer synthetischen Bevölkerung benötigt Daten zu Personen und Haushalten im Untersuchungsraum. Sie können aus einer Haushaltsbefragung abgeleitet werden, die für eine Stichprobe von Haushalten und Personen entscheidungsrelevante Eigenschaften und Präferenzen erfasst. Zusätzlich sind Informationen über die Zusammensetzung der Grundgesamtheit notwendig. Als Haushaltsbefragung können die Erhebung MiD (Mobilität in Deutschland) oder eine eigene Haushaltsbefragung herangezogen werden. Die Grundgesamtheit gibt vor, wie viele Personen und Haushalte mit einer speziellen Eigenschaft (u. a. Geschlecht, Alter oder Pkw-Besitz) in einer räumlichen Einheit gesetzt werden dürfen. Diese Grundgesamtheit wird aus statistischen Bevölkerungsdaten abgeleitet, die auch für die Ermittlung der Personengruppen im makroskopischen Nachfragemodell genutzt werden.

Zur Veranschaulichung der mikroskopischen Modellierung wird im Folgenden ein Pkw-Wahlmodell auf Personenebene vorgestellt. Der Projektbericht enthält zusätzlich ein Pkw-Besitzmodell auf Haushaltsebene und ein ÖV-Zeitkartenmodell auf Personenebene.

Zur Modellierung des Pkw-Besitzes auf Personenebene wird ein diskretes Wahlmodell genutzt, das den Besitz eines Pkw als binäre Variable (ja oder nein) erfasst. Die Schätzung basiert auf dem bundesweiten MiD-Datensatz von 2023, der rund 160.000 Personen umfasst. In der Nutzenfunktion werden diverse soziodemografische sowie siedlungsstrukturelle Merkmale berücksichtigt, die aus den MiD-Daten abgeleitet wurden. Die verwendeten Einflussgrößen umfassen dabei folgende Attribute:

- Geschlecht Weiblich/Männlich
- Alter 8 Kategorien
- Haushaltgröße 5 Kategorien
- Erwerbstätigkeit Ja/Nein
- Ökonomischer Status 5 Kategorien
- Haustyp 3 Kategorien
- Urbanisierungsgrad RegioStaR7 7 Kategorien
- Entfernung [m] nächste ÖV-Haltestelle 6 Kategorien [< 250 m,..., ≥ 5.000 m]

In Tabelle 3 sind die geschätzten Parameter des Modells dargestellt, die die Wirkung der einbezogenen Attribute auf den individuellen Pkw-Besitz abbilden. Als Referenzkategorie wurde der Besitz keines Pkw festgelegt, weshalb für diese Kategorie keine Parameter angegeben sind.

Tabelle 4 zeigt das Ergebnis des Wahlmodells zum Pkw-Besitz für eine Person mit den dargestellten Merkmalen zu Person, Haushalt, Wohnort, Fixkosten, variablen Kosten und Erreichbarkeit. Die Parameter für Pkw-Kosten und Erreichbarkeiten lassen sich nicht aus MiD-Daten ableiten. Sie werden dem Wahlmodell anhand von Elastizitäten aus der Literatur hinzugefügt. Das Beispiel ergibt eine Wahrscheinlichkeit von 71,4 % für den Besitz eines Pkw. Diese Wahrscheinlichkeit kann auf zwei Arten in eine diskrete Entscheidung Pkw = ja/nein überführt werden: Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation durch Ziehen einer Zufallszahl oder Festlegung einer Wahrscheinlichkeit, die sich aus einem bekannten Pkw-Anteil im Untersuchungsraum ergibt.

Attribut	Pkw-Besitz ja		
	Parameter	Standardfehler	t-Wert
Geschlecht			
Männlich	0	-	-
Weiblich	-0,201	0,005	-41,052
Alter			
18–29 Jahre	0	-	-
30–39 Jahre	0,406	0,017	23,366
40–49 Jahre	0,776	0,036	21,690
50–59 Jahre	0,974	0,041	23,920
60–64 Jahre	1,061	0,051	20,704
65–74 Jahre	1,487	0,065	22,770
75–79 Jahre	1,243	0,081	15,296
80 Jahre und älter	0,426	0,026	16,386
Haushaltsgröße			
1	0	-	-
2	0,564	0,017	32,261
3	0,429	0,018	23,728
4	0,680	0,031	21,897
5+	0,401	0,028	14,100
Berufstätigkeit			
Berufstätig	0	-	-
Nicht berufstätig	-0,440	0,016	-28,260
Ökonomischer Status			
Sehr niedrig	0	-	-
Niedrig	0,576	0,037	15,645
Mittel	0,946	0,052	18,227
Hoch	1,180	0,063	18,695
Sehr hoch	1,433	0,084	17,012
Haustyp			
Ein-/Zweifamilienhaus	0	-	-
Mehrfamilienhaus	-0,771	0,022	-35,549
Geschosswohnungsbau	-0,934	0,054	-17,211
Urbanisierungsgrad RegioStaR7			
Stadtregion – Metropole	0	-	-
Stadtregion – Regiopole und Großstadt	0,485	0,016	29,846
Stadtregion – Mittelstadt, städtischer Raum	0,918	0,032	29,111
Stadtregion – kleinstädtischer, dörflicher Raum	1,234	0,083	14,793
ländliche Region – zentrale Stadt	0,881	0,047	18,775
ländliche Region – Mittelstadt, städtischer Raum	1,013	0,049	20,503
ländliche Region – kleinstädtischer, dörflicher Raum	1,403	0,087	16,158
Entfernung [m] nächste ÖV-Haltestelle			
unter 250 m	0	-	-
250 bis unter 500 m	0,124	0,004	31,688
500 bis unter 1.000 m	0,248	0,015	16,449
1.000 bis unter 2.500 m	0,541	0,052	10,358
2.500 bis unter 5.000 m	0,539	0,070	7,685
5.000 m und mehr	0,434	0,106	4,080

Tabelle 3: Mikroskopisches Mobilitätswerkzeugwahlmodell – Personenebene Pkw-Besitz

Attribut	Beispielperson	Nutzenbeitrag
Geschlecht	Weiblich	-0,201
Alter	40–49 Jahre	0,776
Haushaltsgröße	2	0,564
Berufstätigkeit	Ja	0
Ökonomischer Status	Mittel	0,946
Haustyp	Mehrfamilienhaus	-0,771
Urbanisierungsgrad RegioStar7	ländliche Region – Mittelstadt, städtischer Raum	1,013
Entfernung [m] nächste ÖV-Haltestelle	500 bis unter 1.000 m	0,248
Energiekosten Pkw	2,2 €/Weg	$-0,1 \cdot 2,2 = -0,22$
Parkkosten Pkw	0,6 €/Weg	$-0,15 \cdot 0,6 = -0,09$
Fixkosten Pkw	2,5 €/Weg	$-0,1 \cdot 2,5 = -0,25$
Pkw-Erreichbarkeit	0,010	$0,6 \cdot \ln(0,010) = -2,76$
ÖV-Erreichbarkeit	0,004	$-0,3 \cdot \ln(0,004) = 1,66$
Summe		0,916
Pkw-Besitz $p_{Pkw} = \frac{e^{0,916}}{1+e^{0,916}} = 71,4 \%$		

Tabelle 4: Mikroskopisches Mobilitätswerkzeugwahlmodell – Beispiel Pkw-Besitz

4 Präferenzänderungen

4.1 Grundlagen

Verkehrsnachfragemodelle können Verhaltensänderungen infolge von Anpassungen am Verkehrsangebot oder demografischen Änderungen abbilden. Zukünftige Präferenzänderungen, z. B. wie Personen ihre Zeit bewerten oder welche Bedeutung sie der Privatsphäre beim Ridepooling geben, können dagegen nicht prognostiziert werden. Tabelle 5 zeigt Beispiele aus dem Radverkehr, die zu Verhaltensänderungen bei der Moduswahl führen können:

- **Änderungen am Verkehrsangebot:** Die Änderungen beeinflussen die Qualität des Verkehrsangebots. Auf diese Änderungen reagiert ein Moduswahlmodell über die im Modell enthaltenen Kenngrößen der Angebotsqualität, z. B. den Zeitaufwand.
- **Änderungen der Präferenzen:** Bei der Modellerstellung werden die Parameter der Nutzenfunktion so geschätzt, dass beobachtete und modellierte Wahlentscheidungen (=Verhalten) möglichst gut übereinstimmen. Die Parameter quantifizieren dabei die Mobilitätspräferenzen durch eine Bewertung der wahrgenommenen Kosten, der Zeitaufwände, des Komforts und der Nutzbarkeit der Verkehrsmittel. Präferenzen sind das Ergebnis der Mobilitätskultur und spiegeln persönliche Einstellungen, Werte und Haltungen gegenüber Verkehrsmitteln wider. Sie können sich im Laufe der Zeit ändern. Auf Präferenzänderungen reagiert ein Moduswahlmodell nur dann, wenn die Parameter angepasst werden.

Verhaltensänderungen aufgrund von Angebotsänderungen	Umsetzung in einem Moduswahlmodell
Stellplatzsituation Rad wird verbessert. Es gibt Stellplätze nahe am Ziel mit guten und schnell nutzbaren Abstellmöglichkeiten.	Kenngroße Zu- und Abgangszeit: Wert sinkt
Fahrtzeit wird objektiv schneller: • Netzausbau • Nutzung Pedelec	Kenngroße Fahrtzeit: Wert sinkt
Verhaltensänderungen aufgrund von Präferenzänderungen	Umsetzung in einem Moduswahlmodell
Die Bereitschaft, das Fahrrad als Verkehrsmittel in Betracht zu ziehen, steigt. Das Alltagsleben ist für das Radfahren vorbereitet, z. B. Fahrradtaschen für Laptop.	Änderung modusspezifische Konstante
Fahrtzeit wird stärker als positive Aktivität (z. B. Gesundheit) wahrgenommen.	Änderung Parameter Fahrtzeit
Fahrtzeit wird auf ausgewählten Verkehrsanlagen (z. B. Fahrradstraßen) subjektiv als besser wahrgenommen.	Änderung Parameter Fahrtzeit

Tabelle 5: Ursachen für Verhaltensänderungen im Radverkehr und Umsetzung in einem Moduswahlmodell

4.2 Modellierungsansatz

Die Entwicklung der Mobilitätskulturen, die zu veränderten Mobilitätspräferenzen führen, lässt sich prinzipiell über Verhaltensparameter abbilden. Allerdings werden in den meisten Fällen empirische Grundlagen fehlen, aus denen sich eine zukünftige Veränderung der Verhaltensparameter ableiten lässt. Um in diesen Fällen trotzdem Änderungen modellieren zu können, sind Annahmen erforderlich. Annahmen können über Setzungen von Parametern oder über die Setzung von Ergebnissen in ein Modell eingehen:

- Setzung von Parametern: Verhaltensparameter (z. B. Aktivitätenhäufigkeiten, Verkehrsmittelpräferenzen oder Value of Time) werden gesetzt und nach Möglichkeit (z. B. mit Werten aus der Literatur oder Wirkungsvermutungen) begründet. Mit den veränderten Parametern werden neue Modellergebnisse ermittelt.
- Setzung von Ergebnissen: Ein gewünschtes Ergebnis (z. B. ein Modal-Split-Anteil für einen Modus oder mittlere Reiseweite bei der Zielwahl) wird vorgegeben. Die Verhaltensparameter (z. B. die modusspezifische Konstante in der Moduswahlfunktion oder fiktive Pkw-Nutzungskosten) werden so angepasst, dass das Ergebnis erreicht wird. Das Ergebnis zeigt dann u. a. die Verlagerung zwischen den Modi. Diese Art der Modellierung kann als „normative Modellierung“ bezeichnet werden.

In beiden Fällen soll als Teil der Modellierung nachgewiesen werden, inwieweit die erwarteten Änderungen von weiteren verkehrlichen Maßnahmen, z. B. dem Ausbau des Radnetzes, begleitet werden müssen, sodass für jeden Modus ausreichende Kapazitäten vorhanden sind. Zudem muss dabei klar dokumentiert werden, dass es sich um eine politisch oder planerisch begründete Setzung handelt und welche Annahmen dieser zugrunde liegen. Zur Plausibilisierung der Ergebnisse empfiehlt sich die Berechnung der sich ergebenden Nachfrageelastizitäten sowie ein Abgleich mit Werten aus der Literatur bzw. vergleichbaren Untersuchungen.

Um sicherzustellen, dass die verwendeten Modelle plausibel auf die vorgenommenen Anpassungen reagieren, sollte die Modellqualität bereits zu Beginn der Untersuchung anhand von Realitätstests überprüft werden (vgl. EVNM-PV Kapitel 6.7.4). Hierzu sind geeignete Vorgaben für die als plausibel erachteten Elastizitäten verschiedener Variablen zu machen. Die nachfolgende Abbildung enthält beispielhaft mögliche Vorgaben für die Elastizitäten des Radverkehrs. Dargestellt sind als realistisch erachtete Ober- bzw. Untergrenzen für die zu erzielende Modellsensitivität. Die Einhaltung entsprechender Vorgaben ist im Rahmen der Maßnahmenuntersuchung für den jeweiligen Anwendungsfall zu dokumentieren.

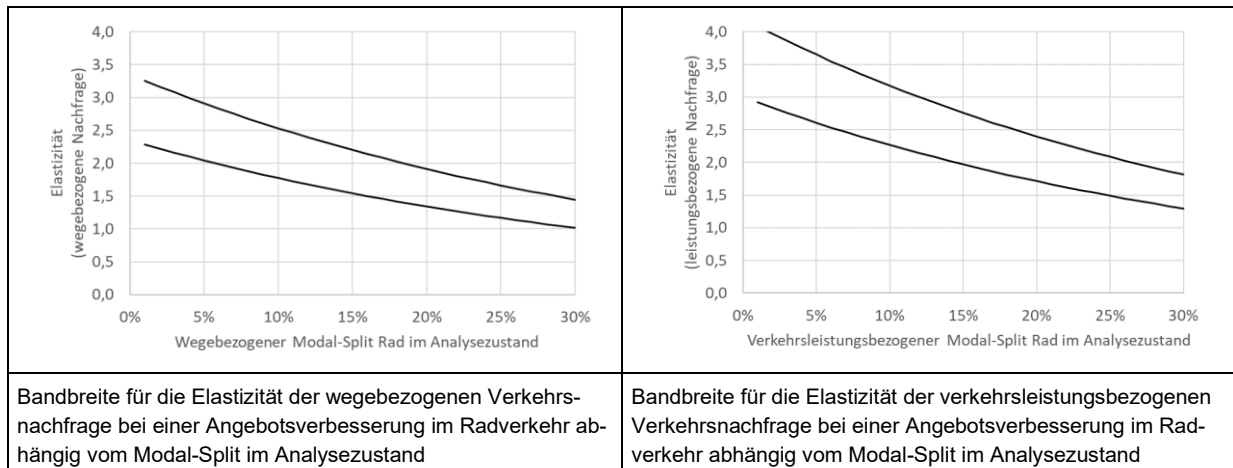


Bild 3: Beispielhafte Vorgabe Elastizitäten Radverkehr (Schmaus et al. 2023)

5 On-Demand-Angebote

5.1 Grundlagen

On-Demand-Angebote in Form von Carsharing und Ridepooling zielen darauf ab, den individuellen Pkw-Besitz zu reduzieren, die Fahrzeugauslastung zu erhöhen und die Moduswahl zu beeinflussen. Carsharing erhöht die Nutzungshäufigkeit einer Fahrzeugflotte und kann den Pkw-Besitz senken. Ridepooling soll insbesondere in ländlichen Räumen und in verkehrsschwachen Zeiten den öffentlichen Verkehr ergänzen und attraktiver machen. Um eine Abschätzung der Wirkungen von On-Demand-Angeboten auf die Verkehrsnachfrage und die betrieblichen Aufwände zu ermöglichen, sind geeignete Verkehrsnachfragemodelle erforderlich. Für die Abbildung kleinräumiger Verflechtungen wie der Bündelung von Fahrtwünschen und den damit verbundenen Umwegen kommen häufig mikroskopische, agentenbasierte Modelle zum Einsatz. Sie sind allerdings mit den vorhandenen makroskopischen Nachfragemodellen nur bedingt kompatibel und aufwendig in der Modellierung. Deshalb sind makroskopische Modelle für die Abbildung von On-Demand-Angeboten erforderlich, die eine höhere Abstraktion aufweisen als die mikroskopischen Modelle und sich möglichst einfach in vorhandene makroskopische Nachfragemodelle integrieren lassen.

5.2 Modellierungsansatz

Es gibt bereits Modelle, mit denen sich Ridepooling-Angebote in vorhandene makroskopische Modelle integrieren lassen (Friedrich et al. 2018, Richter 2022, Thomsen and Liedtke 2026). Diese Ansätze zur Integration von On-Demand-Angeboten in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle erfordern eine disaggregierte Modellstruktur, insbesondere durch die Verkleinerung der Verkehrszellen sowie die Auflösung der Tagesnachfrage in feingliedrige Zeitintervalle. Diese Differenzierung ist notwendig, um betriebliche Kenngrößen des On-Demand-Angebots wie Einsatzkilometer, Einsatzstunden oder Fahrzeuganzahl realitätsnah zu ermitteln. Das damit verbundene Maß an Komplexität und Rechenaufwand stellt jedoch eine Hürde für eine flächendeckende Anwendung dar. Deshalb wurde eine Methode entwickelt, mit der die Nachfrage und die betrieblichen Kenngrößen ohne strukturelle Änderungen an der räumlich-zeitlichen Auflösung des Modells abgeschätzt werden können (Seelhorst 2026). Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte:

1. Definition von On-Demand-Bediengebieten.
2. Setzung der Bedienform für alle Relationen zwischen den Verkehrszellen (Bild 4):
 - On-Demand-Direktfahrten: Relationen innerhalb eines Bediengebiets.
 - On-Demand-Zubringer: Relationen vom Bediengebiet zum fahrplangebundenen ÖV.
 - Fahrplangebundener ÖV: Relationen, die unabhängig vom On-Demand-Verkehr sind.

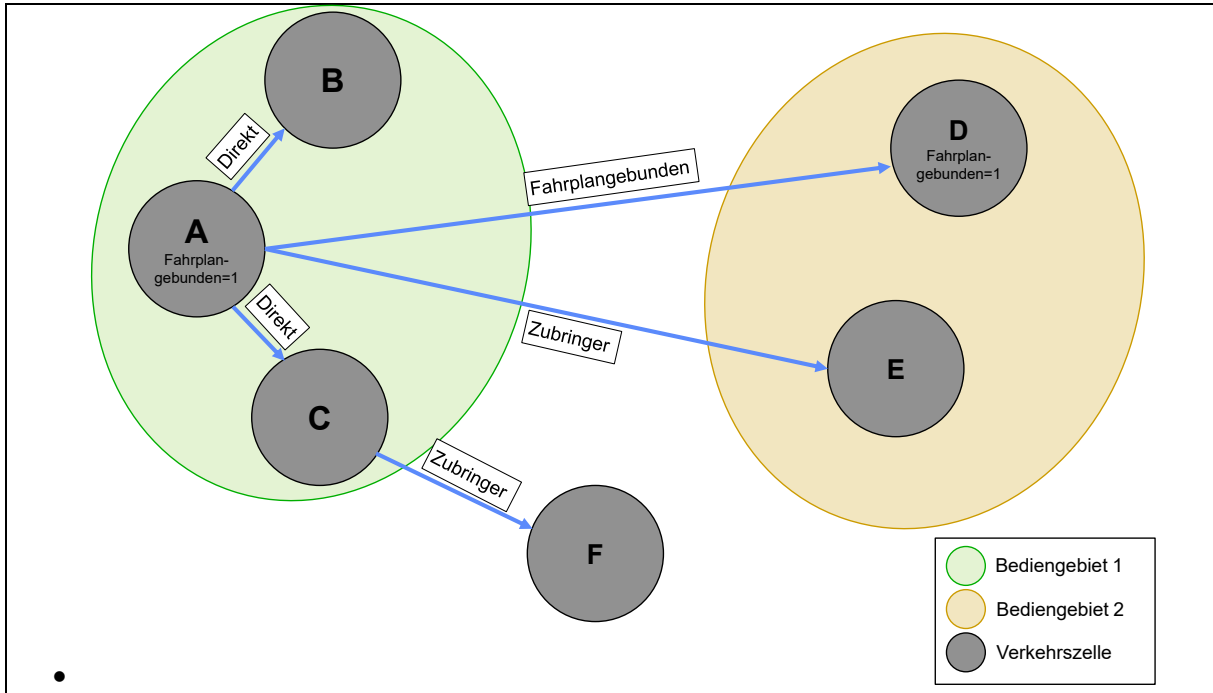


Bild 4: On-Demand-Angebot – beispielhafte Setzung der Bedienform

3. Ermittlung der ÖV-Kenngrößenmatrizen (Zeiten, Umsteigehäufigkeit) für die Moduswahl:
 - On-Demand-Direktfahrt: Der zeitliche Verlauf setzt sich dabei aus der Zugangszeit von der Quelle bis zur On-Demand-Haltestelle, der Startwartezeit, der Fahrzeit im On-Demand-Fahrzeug und der Abgangszeit von der Ankunftshaltestelle bis zum Ziel zusammen. Die Fahrzeit im On-Demand-Fahrzeug wird aus der Fahrzeit im belasteten Netz für den Pkw abgeleitet. Um die Bündelung mehrerer Fahrtwünsche und das Anfahren mehrerer Haltestellen zu berücksichtigen, wird ein Umwegfaktor auf die Pkw-Fahrzeit angewendet. Dieser Wert ist eine betriebliche Setzung, die den Umweg angibt, der Fahrgästen im Mittel zugemutet werden kann.
 - On-Demand-Zubringer: Bei Zubringerfahrten zum nächstgelegenen fahrplangebundenen ÖV-Angebot fällt zusätzlich eine Umsteigezeit für den Übergang vom On-Demand-Angebot auf das fahrplangebundene Verkehrsmittel an.
 - Fahrplangebundener ÖV: Die Kenngrößen werden mit einer fahrplanfeinen Umlegung ermittelt.
4. Moduswahl: Die Moduswahl nutzt das im Nachfragemodell implementierte Moduswahlmodell mit den modifizierten ÖV-Kenngrößen. Die resultierende ÖV-Nachfragematrix kann anschließend nach unterschiedlichen Bedienformen und den Bediengebieten gefiltert werden. Für jedes Bediengebiet lässt sich so die Nachfrage für das On-Demand-System als Zahl der On-Demand-Personenfahrten und als On-Demand-Personenkilometer abschätzen.

5. Durchschnittlicher Besetzungsgrad: Aus den On-Demand-Personenkilometern und den Einwohnern in einem Bediengebiet wird ein durchschnittlich zu erwartender Besetzungsgrad abgeleitet. Hierfür wird der in Bild 5 dargestellte Zusammenhang genutzt, der das Ergebnis von Modellrechnungen ist.
6. Mittlere Fahrtweite einer On-Demand-Fahrzeugfahrt: Aus dem Besetzungsgrad ergibt sich die mittlere Fahrtweite. Sie berücksichtigt Umwege, die durch das Aufsammeln weiterer Fahrgäste entstehen, und setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:
 - Fahrtweite des ersten Fahrgasts, der ohne Umweg befördert werden könnte.
 - Zusätzliche Fahrtweite für das Einsammeln weiterer Fahrgäste, deren Zahl sich aus dem mittleren Besetzungsgrad ergibt. Jeder Fahrgast erhöht die Fahrtweite um den angenommenen mittleren Umwegfaktor (z. B. 1,3).
 - Zusätzliche Fahrtweite für Umsetzfahrten ohne Fahrgäste: Sie kann ebenfalls aus den On-Demand-Personenkilometern abgeschätzt werden. In Bediengebieten mit geringer Nachfrage ist der Anteil an Leerfahrten höher als in Gebieten mit hoher Nachfrage. Typische Anteile der Leerfahrten liegen zwischen 40 % und 15 % der Lastkilometer,
7. Mittlere Fahrzeit einer On-Demand-Fahrzeugfahrt: Aus der mittleren Fahrtweite ergibt sich eine mittlere Fahrzeit. Als Geschwindigkeit kann die Pkw-Geschwindigkeit angenommen werden. Zusätzlich müssen Zeiten für jeden Abhol- bzw. Absetzvorgang addiert werden.
8. Zahl der Fahrzeugfahrten pro On-Demand-Fahrzeug in einer Stunde: Die Zahl ergibt sich aus der mittleren Fahrzeit: $n = 1 / \text{mittlere Fahrzeit (h)}$
9. Zahl der erforderlichen Fahrzeuge: Die Zahl ergibt sich aus der On-Demand-Personennachfrage im Bediengebiet in der Spitzenstunde, die durch den mittleren Besetzungsgrad und die Zahl der Fahrzeugfahrten dividiert wird.

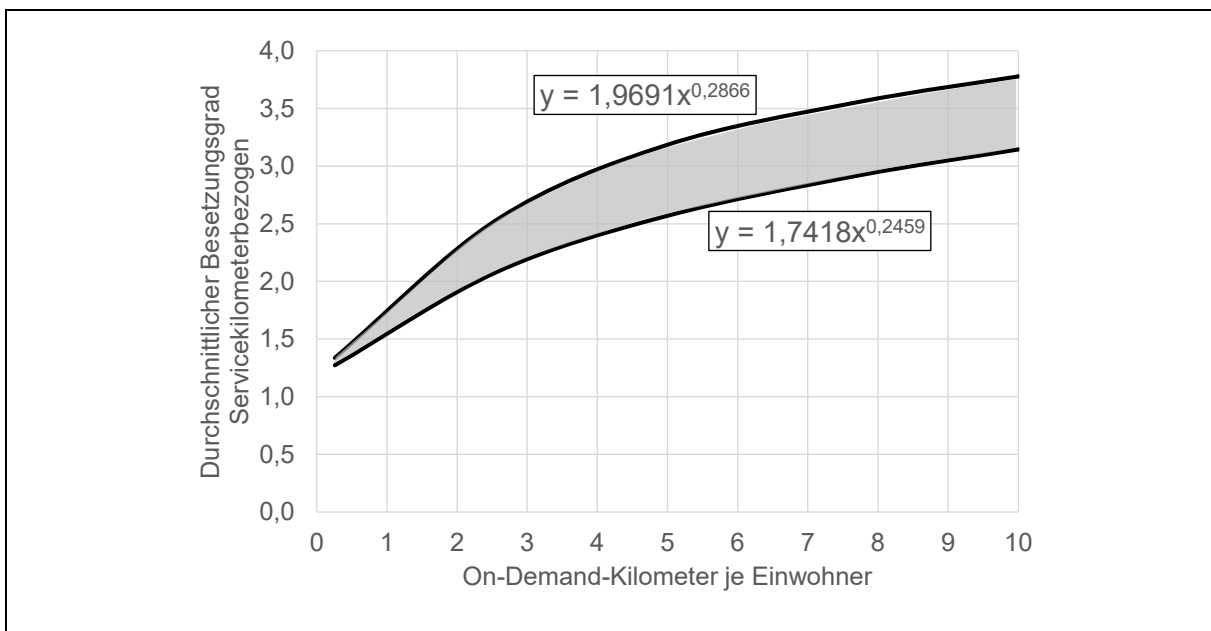


Bild 5: Bandbreite der Eingangsgröße – Durchschnittlicher servicekilometerbezogener Besetzungsgrad (Seelhorst 2026)

6 Fazit

Wir erstellen Modelle in der Erwartung, dass sie uns bei der Vorbereitung verkehrsplanerischer und verkehrspolitischer Entscheidungen unterstützen. Ein Verkehrsnachfragemodell bildet

hierfür die Entscheidungsprozesse von Menschen nach, die zu Verkehr führen. Dabei berücksichtigt es die Raumstruktur, das Verkehrsangebot und die Notwendigkeit von Menschen, an Aktivitäten teilzunehmen, die dann Ortsveränderungen erfordern. Die Parameter der zugrunde liegenden Entscheidungsmodelle werden so kalibriert, dass das Modell beobachtete Entscheidungen zur Mobilitätswerkzeugwahl, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl oder Routenwahl möglichst gut abbildet. Ein kalibriertes Modell ermöglicht dann Aussagen, wie sich Menschen bei veränderten Rahmenbedingungen verhalten würden. Ein solches Modell hilft uns in mehrfacher Weise:

- Wir können prüfen, in welchem Umfang angestrebte Ziele mit den vorgesehenen Maßnahmen erreicht werden. Das ist insbesondere bei Klimaschutzmaßnahmen erforderlich, da die Zielerreichung im Verkehrssektor bisher verfehlt wird.
- Es vermeidet Wunschdenken. Wir können prüfen, ob Maßnahmen zu den erwarteten Wirkungen führen oder ob wir Wirkungen über- bzw. unterschätzen.
- Wir können mit Modellen Maßnahmen identifizieren, die besonders wirksam sind. Diese Maßnahmen werden vermutlich politisch schwer umsetzbar sein, sollten aber trotzdem in ihrem Wirkungsbeitrag bekannt sein.

Die beschriebenen Modellerweiterungen ermöglichen es, Wirkungen von Klimaschutzmaßnahmen, die auf Änderungen beim Motorisierungsgrad, beim Zeitkartenbesitz und bei On-Demand-Angeboten setzen, besser abzuschätzen. Die normative Modellierung zeigt potenzielle Wirkungen auf, die sich ergeben würden, wenn vorgegebene Ziele (z. B. höherer Radanteil) erreicht oder vermutete Präferenzänderungen eintreten würden. Eine Besonderheit des Projekts ist die Bereitstellung von Demo-Nachfragemodellen, die die Nutzung der Weiterentwicklungen in der Praxis erleichtern sollen.

7 Literaturverzeichnis

- ARE (2015): Modelltechnische Möglichkeiten der Weiterentwicklung des nationalen Personenverkehrsmodells. Bundesamt für Raumentwicklung. Bern. URL <https://www.are.admin.ch/dam/de/sd-web/Xa49Z1gy5YSD/modelltechnischemoeglichkeitenschlussbericht.pdf>.
- Falc (2026) Facility Location Choice Simulation Tool. URL www.falc-sim.org/de/ (retrieved on 05.08.2026).
- FGSV (2022) Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen für den Personenverkehr: EVNM-PV. 2022. FGSV R2. Vol. 168/2. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.
- Friedrich M, Hartl M, Magg C (2018) A modeling approach for matching ridesharing trips within macroscopic travel demand models. *Transportation*. 45 (9). 1450. DOI 10.1007/s11116-018-9957-5.
- Friedrich M., Seelhorst K., Manz W., Klein S., Pillat J., Mellinger N. (2026) Abbildung von Klimaschutzmaßnahmen in Verkehrsnachfragemodellen. FoPS-Projekt-Nr. VB710004. URL https://fops.de/wp-content/uploads/2026/06/VB710004_Modellierung_Klimaschutzmassnahmen_AB_final.pdf.
- KSG (2019) Bundes-Klimaschutzgesetz. BGBl. I S. 2513. Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 28. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 251) geändert worden ist.
- PopulationSim (2026) Open platform for population synthesis and survey weighting. URL <https://activitysim.github.io/populationsim> (retrieved on 05.08.2026).
- Richter E. (2022) Integration geteilter Fahrzeugflotten in makroskopische Verkehrsnachfragemodelle. Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen. Heft 63. DOI 10.18419/opus-12995.

- Schmaus M, Friedrich M, Pillat J, Kuss P, Fetzter T (2023) Handbuch Modellierung zur modellgestützten Erstellung von Klimamobilitätsplänen. https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/231012_Klimamobilitätspläne_HandbuchModellierung_V0.1_barrierefrei.pdf.
- Seelhorst K. (2026) Anwendung makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle für die Planung von On-Demand-Angeboten. Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen. Heft 68. Universität Stuttgart.
- Seelhorst K, Friedrich M, Manz W, Klein S, Pillat J, Mellinger N (2026) Abbildung von Klimaschutzmaßnahmen in Verkehrsnachfragemodellen – Demomodelle. URL: <https://doi.org/10.18419/DARUS-5955>.
- Silo (2026): Simple Integrated Land Use Orchestrator. URL: <https://silo.zone/> (retrieved on 05.08.2026).
- Simon R, Schiller C, Pestel E, Friedrich M (2021) Next Generation Verkehrsnachfragemodelle. In: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Heureka '21: Optimierung in Verkehr und Transport. Proceedings. FGSV Verlag. Köln. URL https://verlag.fgsv-datenbanken.de/tagungsbaende?kat=HEUREKA&p=3&tagungsband=1271&_titel=Next+Generation-Verkehrsnachfragemodelle.
- Thomsen N, Liedtke G (2026) Reimagining rural transit: model-based insights into demand-responsive transportation. Transportation. DOI 10.1007/s11116-026-10746-6.