

IDENTIFIKATION KRITISCHER VERBINDUNGEN DES ÖFFENTLICHEN PERSONENNAHVERKEHRS IM LÄNDLICHEN RAUM

Nicolas Dirks, Laura Frank, Frank Baumgärtner, Peter Letmathe, Grit Walther

Zusammenfassung: Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) im ländlichen Raum ist häufig durch geringe Abdeckung, niedrige Frequenzen und lange Fahrzeiten gekennzeichnet. Als Folge sind sowohl Arbeitsplätze als auch Orte des täglichen Bedarfs mit dem ÖPNV im ländlichen Raum nur eingeschränkt erreichbar. Die Basis für die Verbesserung der Erreichbarkeit durch den ÖPNV bildet die Identifikation kritischer ÖPNV-Verbindungen. Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel dieses Forschungsprojekts in der Entwicklung einer Methodik zur Identifikation kritischer ÖPNV-Verbindungen zu Arbeitsplätzen und zu Orten des täglichen Bedarfs im ländlichen Raum. Hierfür wird die Mobilitätsnachfrage mit dem ÖPNV-Angebot jeder Verbindung verglichen. In einer Fallstudie wird ein typischer ländlicher Raum untersucht. Die Ergebnisse validieren die Methodik und decken Handlungsbedarf für Entscheidungsträger auf.

Schlüsselwörter: Öffentlicher Personennahverkehr, ländlicher Raum, Erreichbarkeit

IDENTIFICATION OF CRITICAL PUBLIC TRANSPORT CONNECTIONS IN RURAL AREAS

Abstract: Public transport in rural areas is often characterized by low coverage, low frequencies and long travel times. As a result, the accessibility of individual workplaces as well as places of daily need by public transport is limited in rural areas. An improvement of the accessibility by public transport requires the identification of critical public transport connections. Against this background, our aim is to identify critical public transport connections in rural areas both to workplaces and to places of daily need. Herein, the demand for mobility is compared with the offer of public transport for each connection. In a case study a typical rural area is examined. The results validate the methodology and reveal a need for action for decision makers.

Keywords: Public transport, rural area, accessibility

Autoren

M. Sc. Nicolas Dirks

M. Sc. Laura Frank

M. Sc. Frank Baumgärtner

Prof. Dr. Peter Letmathe

Prof. Dr. Grit Walther

RWTH Aachen University

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Kackertstraße 7

D-52072 Aachen

E: nicolas.dirks@om.rwth-aachen.de

laura.frank@om.rwth-aachen.de

baumgaertner@controlling.rwth-aachen.de

letmathe@controlling.rwth-aachen.de

walther@om.rwth-aachen.de

1 EINLEITUNG

Die Sicherstellung einer ausreichenden Erreichbarkeit im ländlichen Raum ist mit großen Herausforderungen verbunden. Aufgrund der geringen Bevölkerungsdichte und langen Wege ist der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) im ländlichen Raum oft durch eine geringe Abdeckung, niedrige Frequenzen und lange Fahrzeiten gekennzeichnet. Daher sind Einwohner ländlicher Räume häufig auf private Fahrzeuge angewiesen, um Arbeitsplätze sowie Points of Interest (POIs) wie Supermärkte zu erreichen. Die Abhängigkeit von privaten Fahrzeugen führt zu Staus, hohen Emissionen sowie zu sozialer Ausgrenzung für Einwohner ohne Zugang zu einem privaten Fahrzeug.

Zur Erhöhung der Erreichbarkeit im ländlichen Raum erwägen Entscheidungsträger daher Maßnahmen zur Verbesserung des vorhandenen ÖPNV-Angebots, wie beispielsweise die Einführung bedarfsorientierter Mobilitätskonzepte. Ein erster Schritt hierfür besteht in der Identifikation sogenannter kritischer Verbindungen, d. h. von Verbindungen, die sowohl die Notwendigkeit als auch das Potenzial zur Verbesserung der Erreichbarkeit, wie Reisezeiten, Reisegeschwindigkeiten, Abdeckung sowie Frequenzen, bieten. Die Identifikation kritischer Verbindungen hängt somit sowohl von der Mobilitätsnachfrage als auch vom bestehenden ÖPNV-Angebot der Verbindungen ab. Die Mobilitätsnachfrage resultiert hierbei aus vielfältigen Bedürfnissen und beinhaltet sowohl Verbindungen zu individuellen Arbeitsplätzen als auch zu verschiedenen POIs.

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel dieses Forschungsprojekts in der Entwicklung einer Methodik zur Identifikation kritischer ÖPNV-Verbindungen im ländlichen Raum sowohl zu Arbeitsplätzen als auch zu POIs. Die zugrunde liegende Methodik wurde gemeinsam mit Verkehrsplanern der Kreisverwaltung Heinsberg im Rahmen des NRW Forschungskollegs ACCESS! in einem agilen Entwicklungsprozess entwickelt. Der Entwicklungsprozess wurde von zwei studentischen Abschlussarbeiten begleitet (Helders 2019, Güngör 2019). Die Methodik stellt die Mobilitätsnachfrage dem bestehenden ÖPNV-Angebot gegenüber. Basierend auf der Gegenüberstellung werden alle Verbindungen nach ihrer Priorität

hinsichtlich des Handlungsbedarfs zur Verbesserung des ÖPNV-Angebots klassifiziert. Die Methodik dient somit als ein transparentes Instrument für öffentliche Entscheidungsträger, um den ÖPNV im ländlichen Raum zu verbessern.

In einer Fallstudie wird mit dem Kreis Heinsberg ein ländlicher Raum in Deutschland untersucht. Mithilfe eines Prognosemodells sowie realen Pendlerdaten wird die Mobilitätsnachfrage von Wohnorten zu Arbeitsplätzen ermittelt. Kategorien von POIs werden in Abstimmung mit Entscheidungsträgern im Kreis Heinsberg festgelegt. Die Mobilitätsnachfrage von Wohnorten zu POIs basiert auf Einwohnerzahlen.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut. Kapitel 2 beinhaltet eine Analyse relevanter Literatur. In Kapitel 3 wird die Methodik zur Identifikation kritischer ÖPNV-Verbindungen beschrieben. Kapitel 4 umfasst eine Beschreibung der Fallstudie sowie Ergebnisse. Schließlich beinhaltet Kapitel 5 ein Fazit sowie einen Ausblick.

2 LITERATUR

Dieses Kapitel bietet einen kurzen Überblick relevanter Literatur und eine Analyse dieser hinsichtlich der sich aus der Zielsetzung ergebenden Anforderungen. Aus dem Ziel der Identifikation kritischer ÖPNV-Verbindungen resultieren folgende Anforderungen. Die Mobilitätsnachfrage und das ÖPNV-Angebot sind sowohl zu Arbeitsplätzen als auch zu POIs abzubilden. Mobilitätsnachfrage und ÖPNV-Angebot liegen hierbei auf den Verbindungen zwischen einer Quelle und einem Ziel. Daher müssen kantengenaue Verkehrsflüsse und Reisezeiten berücksichtigt werden.

Aktuelle Ansätze zur Bestimmung der Mobilitätsnachfrage verwenden unterschiedliche Methoden. Aufgrund ihrer einfachen Anwendbarkeit werden häufig Gravitationsmodelle zur Bestimmung von Quelle-Ziel-Matrizen verwendet. Kang et al. (2015) erweitern das Radiationsmodell von Simini et al. (2012), um Quelle-Ziel-Matrizen aus punktbasierten Einwohner- und Pendlerzahlen zu bestimmen. Die Erweiterung umfasst die Einführung von vier Abwandlungen sowie zwei Kalibrierungsparametern, um die Mobilitätsnachfrage genauer und fallspezifischer bestimmen zu können. Die Nutzung von Mobilfunkdaten gewinnt aufgrund der hohen

Genauigkeit zunehmend an Bedeutung. Iqbal et al. (2014) und Bwambale et al. (2017) zeigen, wie sich Quelle-Ziel-Matrizen mithilfe von Mobilfunkdaten bestimmen lassen.

Aktuelle Ansätze zur Messung des ÖPNV-Angebots basieren häufig auf der Analyse von ‚General Transit Feed Specification‘ (GFTS)-Daten. Diese beinhalten Pläne des ÖPNV mit exakten Routen und Fahrzeiten. Durch die Verwendung dieser Daten können kantengenaue ÖPNV-Reisezeiten von einer Quelle zu einem Ziel bestimmt werden. Aktuelle Ansätze unterscheiden sich insbesondere darin, ob das ÖPNV-Angebot zu Arbeitsplätzen oder zu POIs bewertet wird. Goliszek (2017) bewertet das ÖPNV-Angebot zu Arbeitsplätzen in Abhängigkeit von Tageszeiten. Deboose & El-Geneidy (2018) untersuchen das ÖPNV-Angebot zu Arbeitsplätzen für sozial schwache Bevölkerungsschichten. Kim & Lee (2019) analysieren das ÖPNV-Angebot zu Arbeitsplätzen, indem sie unter anderem die Anzahl und die Frequenz von Verbindungen berücksichtigen. Cui et al. (2019) untersuchen das ÖPNV-Angebot zu Arbeitsplätzen in Abhängigkeit von Faktoren wie Einkommen und Bildung. Campbell et al. (2019) bewerten das ÖPNV-Angebot zu POIs mit verschiedenen Indizes. Die bisher beschriebenen Ansätze zur Messung des ÖPNV-Angebots verwenden kantengenaue ÖPNV-Reisezeiten. Allerdings beschränken sich die Ansätze entweder auf die Bewertung des ÖPNV-Angebots zu Arbeitsplätzen oder auf die Bewertung des ÖPNV-Angebots zu POIs.

Es existieren weitere Ansätze, die sowohl das ÖPNV-Angebot zu Arbeitsplätzen als auch zu POIs berücksichtigen. Hernandez (2018) untersucht das ungleiche ÖPNV-Angebot zu Arbeitsplätzen und zu POIs für verschiedene soziale Bevölkerungsschichten. Giuffrida et al. (2017) entwickeln einen Index zur Bestimmung sozialer Mobilitätsbedürfnisse zu Arbeitsplätzen sowie zu POIs und stellen somit das ÖPNV-Angebot der Mobilitätsnachfrage gegenüber. Beide Ansätze beinhalten allerdings keine kantengenauen ÖPNV-Reisezeiten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über relevante Literatur hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen an die Methodik.

Aus Tabelle 1 wird deutlich, dass nur ein Ansatz (Giuffrida et al. 2017) die Mo-

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Mobilitätsnachfrage										
zu Arbeitsplätzen	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓
zu POIs	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓	✓
mit kantengenaue Verkehrsflüssen	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓
ÖPNV-Angebot										
zu Arbeitsplätzen	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	-	-
zu POIs	-	-	-	✓	-	✓	✓	-	-	-
mit kantengenaue Reisezeiten	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-

(I) – (X) beschreiben die Ansätze wie folgt:
 (I) Goliszek 2017, (II) Deboosere & El-Geneidy 2018, (III) Kim & Lee 2019, (IV) Campbell et al. 2019, (V) Cui et al. 2019, (VI) Hernandez 2018, (VII) Giuffrida et al. 2017, (VIII) Kang et al. 2015, (IX) Iqbal et al. 2014, (X) Bwambale et al. 2017

Tabelle 1: Erfüllung der Anforderungen der Zielsetzung in aktueller Literatur

bilitätsnachfrage dem ÖPNV-Angebot gegenüberstellt. Allerdings betrachtet dieser Ansatz weder kantengenaue Verkehrsflüsse noch kantengenaue ÖPNV-Reisezeiten. Im folgenden Kapitel wird eine Methodik vorgestellt, die alle in Tabelle 1 aufgeführten Anforderungen erfüllt.

3 METHODIK

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Identifikation kritischer ÖPNV-Verbindungen vorgestellt. Zunächst werden die unterschiedlichen Perspektiven der Erreichbarkeit zu Arbeitsplätzen und POIs verdeutlicht. Anschließend wird die Abfolge der Methodik für beide Perspektiven erläutert.

Um kritische Verbindungen zu identifizieren, wird jede Verbindung hinsichtlich der Mobilitätsnachfrage und des ÖPNV-Angebots bewertet. Dabei sollen sowohl die Verbindungen zu Arbeitsplätzen als auch zu POIs bewertet werden. Da die Wahl des Arbeitsplatzes zumeist von individuellen Präferenzen abhängt, sind Verbindungen zu sämtlichen Arbeitsplätzen gewichtet mit der jeweiligen Nachfrage zu ermitteln. Hingegen wird in Abstimmung mit Entscheidungsträgern im ländlichen Raum die Verbindung zu dem am schnellsten zu erreichenden POI berücksichtigt. Abbildung 1 verdeutlicht beide Perspektiven.

Die Methodik umfasst vier Schritte und ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Methodik ist hinsichtlich der Abfolge der Schritte für beide Perspektiven identisch, unterscheidet sich jedoch in der Ausführung der Schritte. Die Datenerhebung wird in einer Fallstudie im nachfolgendem Kapitel 4 be-

schrieben. In *Schritt 1a* wird die Menge der Startknoten $i \in O$, in *Schritt 1b* die Menge der Zielknoten $j \in D$ bestimmt. Die Menge der Startknoten $i \in O$ bildet die Bevölkerung ab. Die Menge der Zielknoten $j \in D$ beinhaltet je nach Perspektive die Standorte von Arbeitsplätzen oder die Standorte von POIs. Die Standorte von POIs werden für jede Kategorie von POIs $p \in P$ einzeln definiert. Die Menge von Zielknoten $j \in D_p \subseteq D$ beinhaltet alle Zielknoten, an denen ein POI der Kategorie $p \in P$ vorhanden ist. Beispielsweise könnte an der Hälfte der Zielknoten ein Supermarkt (p_1) vorhanden sein ($|D_{p_1}| = \frac{1}{2}|D|$). In *Schritt 2* werden

alle zulässigen Kanten $\{i, j\} \in A = O \times D$ als Verbindungen zwischen Start- und Zielknoten ermittelt. In *Schritt 3* wird einerseits die Mobilitätsnachfrage (*Schritt 3a*) und andererseits das ÖPNV-Angebot (*Schritt 3b*) jeder Kante $\{i, j\} \in A$ bestimmt. Die Mobilitätsnachfrage wird durch die Anzahl an Reisenden w_{ij} auf einer Kante definiert. Für die Nachfrage zu Arbeitsplätzen verteilt sich die von einem Knoten ausgehende Nachfrage auf alle zu Arbeitsplätzen führenden Kanten. Hingegen konzentriert sich die gesamte Nachfrage zu POIs jeweils auf die Kante zum am schnellsten zu erreichenden POI. Das ÖPNV-Angebot ei-

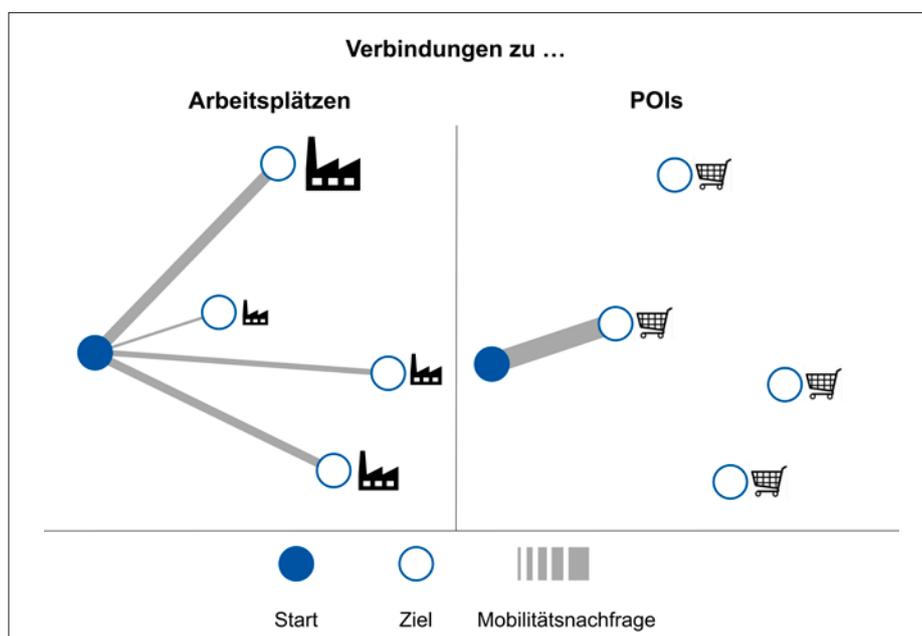


Abbildung 1: Verdeutlichung der zu berücksichtigenden Verbindungen in der Planung des ÖPNV im ländlichen Raum

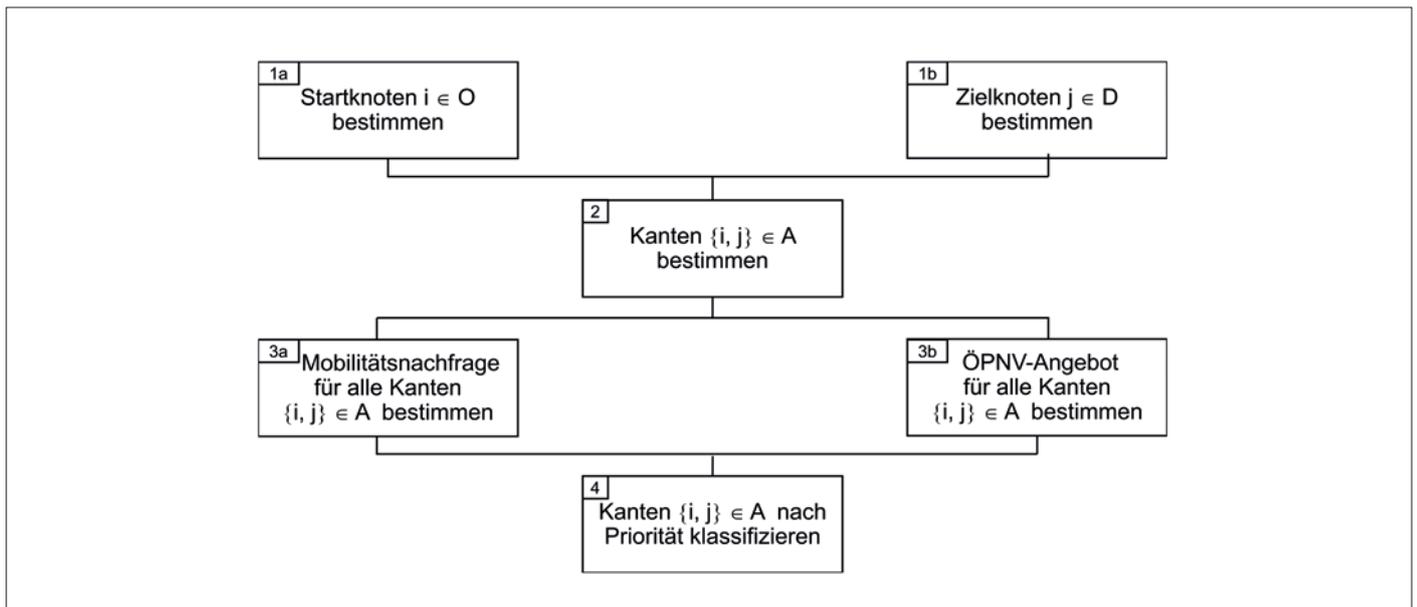


Abbildung 2: Methodik zur Identifikation kritischer Verbindungen des ÖPNV im ländlichen Raum

ner Kante $\{i, j\} \in A$ zu Arbeitsplätzen wird mit der ÖPNV-Geschwindigkeit v_{ij} bewertet, um alle Kanten unabhängig von ihrer Distanz gleichberechtigt zu bewerten. Die ÖPNV-Geschwindigkeiten v_{ij} jeder Kante $\{i, j\} \in A$ werden durch Division abgefragter ÖPNV-Reisezeiten t_{ij} mit Luftliniendistanzen a_{ij} bestimmt: $v_{ij} = t_{ij} / a_{ij}$. Im Gegensatz dazu wird das ÖPNV-Angebot einer Kante $\{i, j\} \in A$ zu POIs mit der ÖPNV-Reisezeit t_{ij} bewertet, da lediglich der am schnellsten zu erreichende POI relevant ist. Die Reisegeschwindigkeiten sowie -fahrzeiten beinhalten Transfer-, Warte- sowie Fußwegezeiten. In *Schritt 4* wird die Mobilitätsnachfrage dem ÖPNV-Angebot gegenübergestellt und jede Kante nach ihrer Priorität hinsichtlich des Handlungsbedarfs klassifiziert, beispielsweise für eine Einführung bedarfsorientierter Mobilitätskonzepte. Die Klassifizierung der Kanten erfolgt anhand von Grenzwerten. Eine Verletzung der Grenzwerte des ÖPNV-Angebots identifiziert Handlungsbedarf. Eine Verletzung der Grenzwerte der Mobilitätsnachfrage deutet auf eine hohe Relevanz dieses Handlungsbedarfs hin. Daher zeichnen sich kritische Kanten zu Arbeitsplätzen durch eine gleichzeitige Überschreitung des Grenzwerts für die Mobilitätsnachfrage W^{lb} sowie Unterschreitung des Grenzwerts für die ÖPNV-Geschwindigkeit V^{ub} aus. Kritische Kanten zu POIs resultieren bei gleichzeitiger Überschreitung des Grenzwerts für die Mobilitätsnachfrage W^{lb} sowie für die ÖPNV-Reisezeit T^{lb} .

4 FALLSTUDIE

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 3 vorgestellte Methodik in einer Fallstudie angewendet. Zuerst beschreibt Abschnitt 4.1 das gewählte Untersuchungsgebiet und die der Fallstudie zugrunde liegenden Daten. In Abschnitt 4.2 werden kritische Kanten zu Arbeitsplätzen identifiziert. In Abschnitt 4.3 werden kritische Kanten zu POIs identifiziert. Schließlich werden die Ergebnisse beider Perspektiven in Abschnitt 4.4

zusammengeführt. In der Fallstudie wird eine QGIS- sowie eine Python-Umgebung verwendet.

4.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET UND DATENGRUNDLAGE

Als Untersuchungsgebiet gewählt wurde der Landkreis Heinsberg, Deutschland. Der Kreis Heinsberg hat 252.651 Einwohner und eine Bevölkerungsdichte von 403 Einwohnern je km^2 (Information und Technik

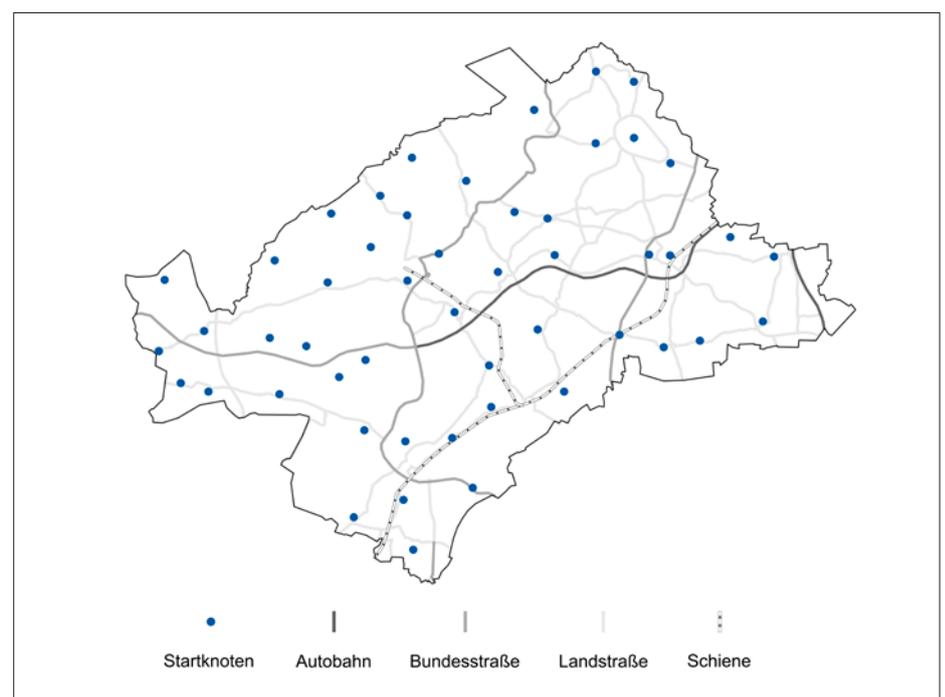


Abbildung 3: Darstellung der gewählten Startknoten und der Verkehrsinfrastruktur des Kreises Heinsberg (Land NRW 2019, eigene Darstellung)

Nordrhein-Westfalen 2019). Die Methodik sowie die Fallstudie wurden in einem agilen Entwicklungsprozess in Zusammenarbeit mit Verkehrsplanern der Kreisverwaltung Heinsberg entwickelt. Ziel der Entscheidungsträger ist es, die kritischsten 2% aller ÖPNV-Verbindungen innerhalb des Kreisgebiets zu identifizieren.

Zunächst wird die diskrete Menge von Startknoten $i \in O$ identifiziert (Schritt 1a). Zur Abbildung der Wohnsitze der Bevölkerung werden in Abstimmung mit den Entscheidungsträgern $|O| = 50$ Startknoten auf Basis von Wahllokalen der Landtagswahlen 2017 definiert (vote iT GmbH 2017). Mittlere potenzielle Fußwege von individuellen Wohnsitzen zu einer nächstgelegenen Haltestelle werden so in der Fallstudie approximiert. In Abbildung 3 sind die gewählten Startknoten sowie die Verkehrsinfrastruktur im Kreis Heinsberg dargestellt.

Als Menge der Zielknoten $j \in D$ (Schritt 1b) werden ebenfalls die zentral gelegenen Wahllokale verwendet $D = O$. Die Berücksichtigung der realen Verteilung von Arbeitsplätzen wird über die spätere Validierung mit Pendlerdaten sichergestellt (siehe Schritt 3a). Zur Bestimmung von POI-Zielknoten in Abhängigkeit der POI-Kategorie werden alle Knoten hinsichtlich der Verfügbarkeit von POIs analysiert. In Abstimmung mit den Entscheidungsträgern des Kreises Heinsberg und übereinstimmend zur Kategorisierung von POIs in der Literatur (Zeng et al. 2017) werden $|P| = 20$ Kategorien von POIs definiert. Die Standorte der POIs im Kreis Heinsberg werden manuell auf Basis von öffentlich zugänglichen Daten (Google Maps 2019) ermittelt und sind unterteilt nach Kategorien in Abbildung 4 dargestellt. Eine automatisierte Abfrage dieser Daten kann entgeltlich sein (Google Maps Platform API 2019). Nutzungsbedingungen müssen in beiden Fällen berücksichtigt werden. Die Menge von Zielknoten $j \in D_p$ einer Kategorie von POIs $p \in P$ besteht aus den Zielknoten, an denen ein POI der Kategorie innerhalb von 15 Minuten (Louis 2004) fußläufig erreichbar ist. Hierbei wird eine Gehgeschwindigkeit von 1,45 m/s (Morgenroth 2008) und ein Umwegfaktor von 1,38 (Zumkeller 2005) angenommen.

Im nächsten Schritt werden die Kanten zwischen allen Start- und Zielknoten erstellt (Schritt 2). Die Mobilitätsnachfrage (Schritt

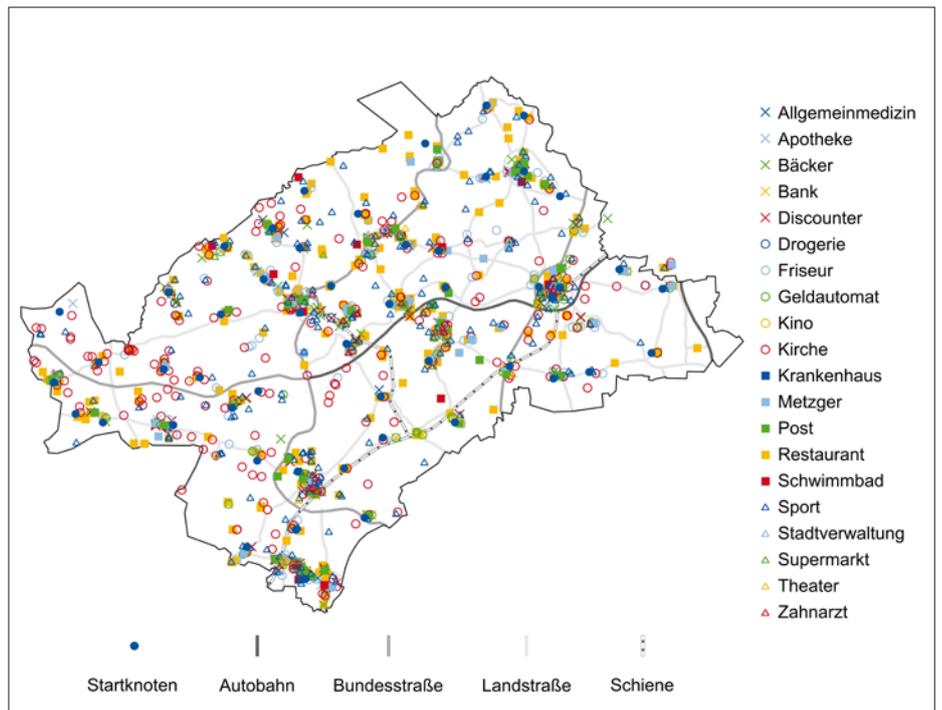


Abbildung 4: Darstellung der Standorte von POIs unterteilt nach POI-Kategorien im Kreis Heinsberg (Land NRW 2019, eigene Darstellung)

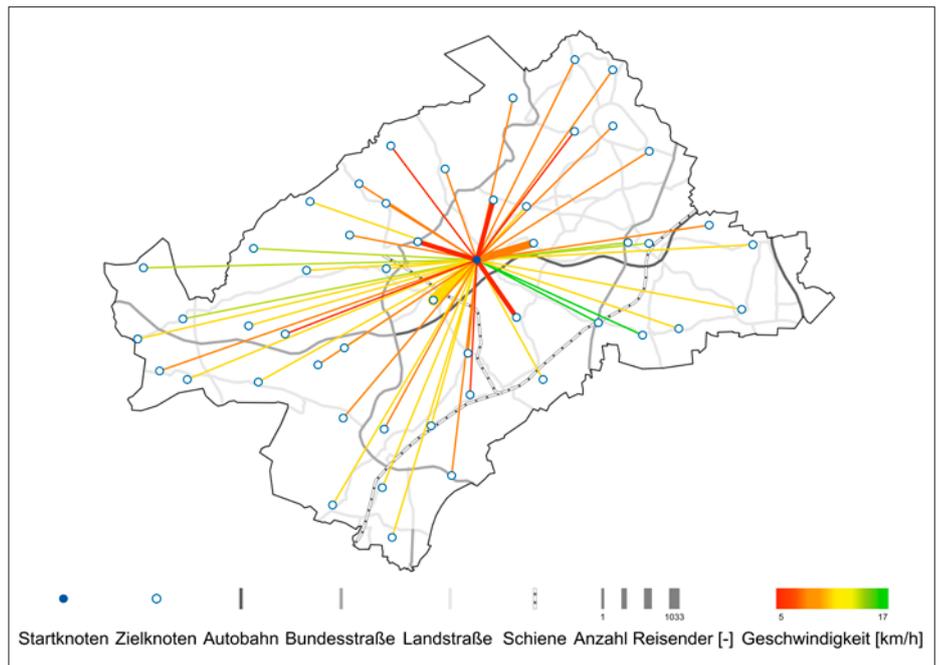


Abbildung 5: Veranschaulichung des ÖPNV-Angebots und der Mobilitätsnachfrage der aus einem zentralen Knoten ausgehenden Kanten (Land NRW 2019, eigene Darstellung)

3a) von Startknoten zu Arbeitsplätzen verteilt sich auf die von einem Startknoten zu Arbeitsplätzen führenden Kanten. Zur Bestimmung der Mobilitätsnachfrage zu Arbeitsplätzen w_{ij}^{work} auf jeder Kante wird das Radiationsmodell nach Kang et al. (2015) angewendet. Demnach hängt die Mobilitätsnachfrage zu Arbeitsplätzen auf einer Kante insbesondere von aus einem Start-

knoten ausgehenden und zu einem Zielknoten führenden Reisen, der Bevölkerung der Start- und Zielknoten sowie der Bevölkerung innerhalb eines vorgegebenen Radius ab. Das Radiationsmodell nach Kang et al. (2015) umfasst vier Abwandlungen sowie zwei Kalibrierungsparameter κ und λ . Zur Auswahl der geeigneten Abwandlung und Parameter wird die geringste Stan-

dardabweichung zu realen Pendlerdaten des Pendleratlas NRW bestimmt (IT.NRW 2018). Entsprechend wird die Abwandlung ‚production-constrained & intervention based‘ sowie die Parametereinstellung $\kappa = 0,66$ und $\lambda = 0,98$ verwendet. Die von einem Startknoten ausgehende Mobilitätsnachfrage zu einer POI-Kategorie wird der Kante zu dem am schnellsten zu erreichenden POI zugeordnet. Dementsprechend wird für jeden Startknoten $i \in O$ der POI $j \in D_p$ einer Kategorie $p \in P$ mit der geringsten ÖPNV-Reisezeit ($j | \min t_{ij} \forall j \in D_p$) identifiziert. Die Mobilitätsnachfrage w_{ij}^{POI} der Kante zu dem am schnellsten zu erreichenden POI wird mit der gesamten Bevölkerung p_i des Startknotens $i \in O$ quantifiziert. Alle anderen Kanten eines Startknotens $i \in O$ zu POIs $j \in D_p$ derselben Kategorie $p \in P$ erhalten den Wert $w_{ij}^{POI} = 0$. Auf eine Gewichtung der Kategorien von POIs wird in Rücksprache mit den Entscheidungsträgern verzichtet, um eine Verzerrung der Ergebnisse zu vermeiden. Diese wäre allerdings mit geringem Aufwand in die Methodik zu integrieren.

Zur Bestimmung des ÖPNV-Angebots (Schritt 3b) von Startknoten zu Arbeitsplätzen werden ÖPNV-Geschwindigkeiten v_{ij} jeder Kante $\{i, j\} \in A$ durch Division abgefragter ÖPNV-Reisezeiten t_{ij} mit Luftliniendistanzen a_{ij} bestimmt. ÖPNV-Reisezeiten werden von öffentlich zugänglichen Datenbanken (Google Maps 2019) abgefragt, die sowohl Transfer-, Warte- und Fußwegezeiten beinhalten. Dazu wird für jede mögliche Kante die schnellste Verbindung an einem Montagvormittag zwischen 9 und 12 Uhr ermittelt. Zur Bestimmung des ÖPNV-Angebots zu POIs werden ebenfalls von öffentlich zugänglichen Datenbanken abgefragte ÖPNV-Reisezeiten t_{ij} verwendet.

4.2 IDENTIFIKATION KRITISCHER VERBINDUNGEN

Zur Identifikation kritischer Verbindungen (Schritt 4) wird die Mobilitätsnachfrage dem ÖPNV-Angebot einer Kante gegenübergestellt. Im Folgenden werden zuerst die Ergebnisse getrennt für Arbeitsplätze sowie POIs dargestellt. Anschließend erfolgt die Zusammenführung der Ergebnisse beider Perspektiven.

Kritische Kanten zu Arbeitsplätzen

Die kritischen Kanten zu Arbeitsplätzen werden zunächst beispielhaft für einen zen-

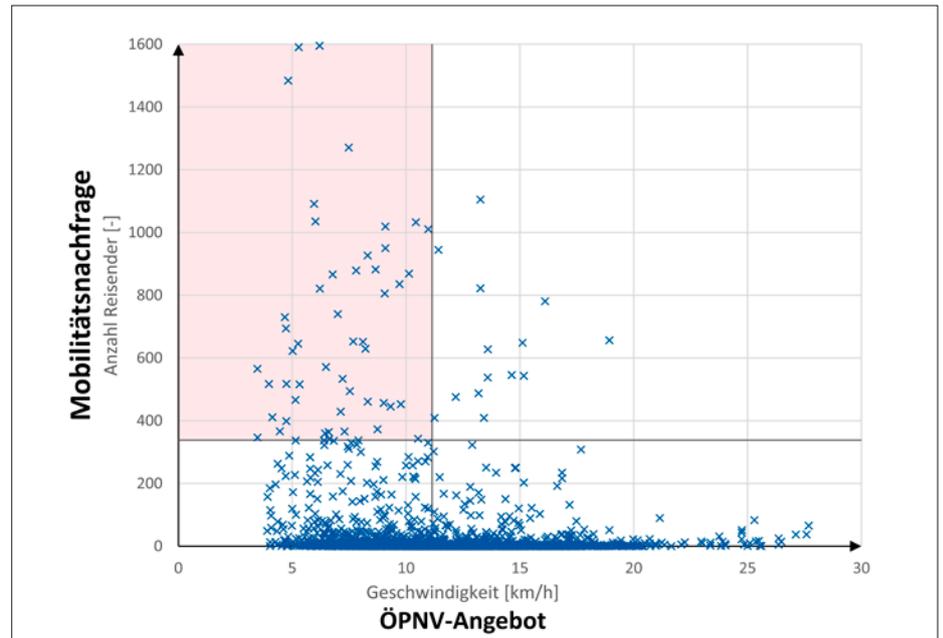


Abbildung 6: Vergleich der Mobilitätsnachfrage mit dem ÖPNV-Angebot aller Kanten zu Arbeitsplätzen und Identifikation kritischer Kanten

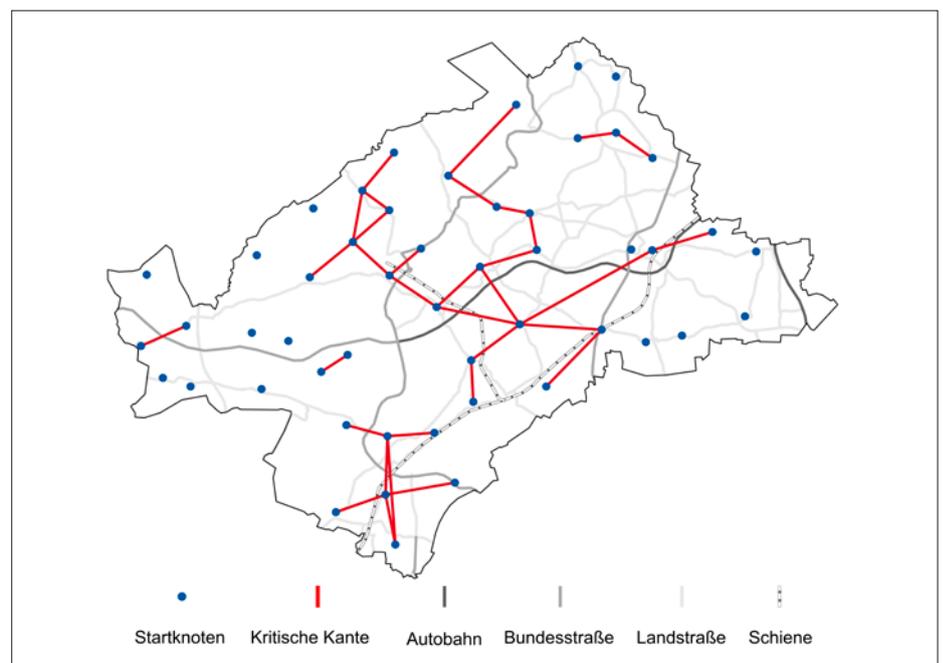


Abbildung 7: Darstellung der identifizierten kritischen Kanten zu Arbeitsplätzen im Kreis Heinsberg (Land NRW 2019, eigene Darstellung)

tral gelegenen Startknoten im Kreis Heinsberg dargestellt. Abbildung 5 zeigt alle von diesem zentralen Knoten ausgehenden Kanten zu den übrigen 49 Zielknoten. Jede Kante ist durch ihre Mobilitätsnachfrage (Anzahl Reisender w_{ij}^{work} , abgestuft nach Breite) sowie durch ihr ÖPNV-Angebot (ÖPNV-Geschwindigkeit v_{ij} , abgestuft nach

ÖPNV-Geschwindigkeit aufweisen. Kanten zu nahegelegenen Zielknoten weisen tendenziell eine hohe Nachfrage, aber eine geringe ÖPNV-Geschwindigkeit auf.

Abbildung 6 zeigt alle 2.450 Kanten zu Arbeitsplätzen klassifiziert nach ihrer Priorität für Handlungsbedarf in einem Streudiagramm. Jeder Datenpunkt repräsentiert eine Kante und ist durch die ÖPNV-Geschwindigkeit sowie die Anzahl der Reisenden gekennzeichnet. Zur Klassifi-

zierung der Kanten sind zudem beide Grenzwerte V^{ub} und W^{lb} eingezeichnet. Als Grenzwert für die ÖPNV-Geschwindigkeit wird der Median $V^{ub} = 11,14 \text{ km/h}$ gewählt. Der Grenzwert für die Mobilitätsnachfrage W^{lb} wird in Absprache mit den Entscheidungsträgern so festgelegt, dass 2% der Kanten den Grenzwert V^{ub} unter- sowie den Grenzwert W^{lb} überschreiten. Dieser Anteil kann je nach gewünschter Anzahl zu identifizierender Kanten variieren. Es ergibt sich ein Grenzwert für die Mobilitätsnachfrage W^{lb} von 338 Reisenden. Der rot markierte Bereich beinhaltet die kritischsten 2% der Kanten. Diese bilden 27% der gesamten Mobilitätsnachfrage zu Arbeitsplätzen ab.

Abbildung 7 stellt die identifizierten kritischsten 2% der Kanten zu Arbeitsplätzen im Kreis Heinsberg dar. Dabei wird deutlich, dass die identifizierten kritischen Kanten eine geringe Distanz aufweisen und überwiegend zusammenhängend sind. Dies lässt darauf schließen, dass eine Verbesserung der ÖPNV-Geschwindigkeit zu Arbeitsplätzen durch geringe Änderungen im bestehenden ÖPNV (z. B. alternative Buslinien) erreicht oder durch eine Einführung bedarfsorientierter Konzepte werden kann.

Kritische Kanten zu POIs

Die kritischen Kanten zu POIs werden zunächst beispielhaft für die POI-Kategorie Supermarkt in Abbildung 8 dargestellt. An 14 der 50 Knoten ist ein Supermarkt fußläufig innerhalb von 15 Minuten erreichbar. Für die übrigen 36 Knoten sind in Abbildung 8 alle Kanten zu den jeweils am schnellsten zu erreichenden Supermärkten eingezeichnet. Jede Kante ist durch ihre Mobilitätsnachfrage (Anzahl Reisender w_{ij}^{work} , abgestuft nach Breite) sowie durch ihr ÖPNV-Angebot (ÖPNV-Reisezeit t_{ij} , abgestuft nach Farben) gekennzeichnet. Abbildung 8 verdeutlicht, dass die meisten Startknoten eine gute Anbindung zu Supermärkten aufweisen. Allerdings existieren in Randgebieten Startknoten mit hoher ÖPNV-Reisezeit zu einem Supermarkt. Mit dem Ziel der Stärkung des ÖPNV-Angebots innerhalb des Kreisgebiets Heinsberg müssten somit kritische Verbindungen zu POIs in Randgebieten verbessert werden. Bei der Konkretisierung des Handlungsbedarfs kritischer Verbindungen zu POIs in Randgebieten sollten allerdings zusätzlich POIs außerhalb des Kreisgebiets Berücksichtigung finden.

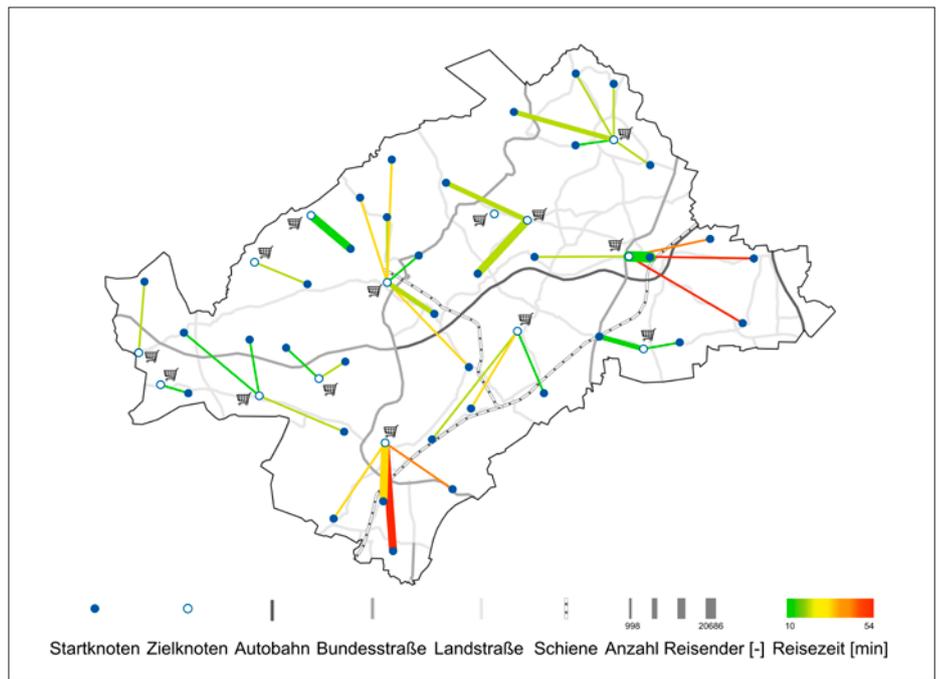


Abbildung 8: Veranschaulichung des ÖPNV-Angebots und der Mobilitätsnachfrage der Kanten zu POIs der Kategorie Supermarkt (Land NRW 2019, eigene Darstellung)

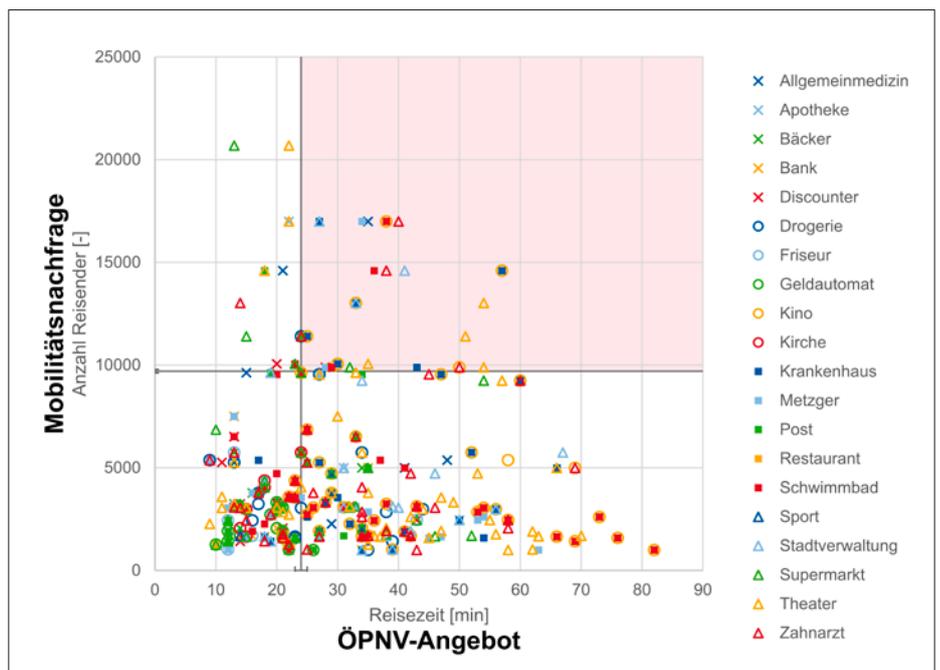


Abbildung 9: Vergleich der Mobilitätsnachfrage mit dem ÖPNV-Angebot aller schnellsten Kanten zu POIs und Identifikation kritischer Kanten

Abbildung 9 zeigt alle 604 Kanten zu allen 20 POI-Kategorien klassifiziert nach ihrer Priorität für Handlungsbedarf in einem Streudiagramm. Jeder Datenpunkt repräsentiert eine Kante und ist durch die ÖPNV-Reisezeit sowie die Anzahl der Reisenden gekennzeichnet. Die POI-Kategorien sind unterschiedlich dargestellt. Analog zum Vorgehen bei Arbeitsplätzen erfolgt die Klassifizierung auf Basis von zwei

Grenzwerten. Zunächst werden die Kanten anhand des Medians der ÖPNV-Reisezeit $T^{lb} = 24 \text{ min}$ unterteilt. Der Grenzwert für die Mobilitätsnachfrage W^{lb} wird so festgelegt, dass 2% der Kanten in den kritischen Bereich (rot) fallen. Es ergibt sich ein Grenzwert für die Mobilitätsnachfrage von $W^{lb} = 9500$. Die kritischsten 2% der Kanten decken 25% der gesamten Mobilitätsnachfrage zu POIs ab. Die vier am häufigs-

ten vertretenen POI-Kategorien im kritischen Bereich sind Krankenhaus, Kino, Drogerie und Theater.

Abbildung 10 stellt die identifizierten kritischsten 2% der Kanten zu POIs im Kreis Heinsberg dar. Die identifizierten kritischen Kanten sind überwiegend zusammenhängend und weisen im Gegensatz zu den kritischen Kanten zu Arbeitsplätzen längere Distanzen auf. Dies lässt sich durch die geringe Dichte von POIs einzelner POI-Kategorien erklären.

Zusammenführung der Ergebnisse beider Perspektiven

Abschließend werden in Abbildung 11 die identifizierten kritischen Kanten zu Arbeitsplätzen (orange) mit den kritischen Kanten zu POIs (grün) zusammengeführt. Sich überschneidende Kanten sind entsprechend orange und grün gestrichelt gekennzeichnet. 7 der 49 kritischen Kanten zu Arbeitsplätzen überschneiden sich mit den 49 kritischen Kanten zu POIs. Es wird deutlich, dass kaum Überschneidungen in den identifizierten kritischen Kanten beider Perspektiven bestehen. Der anfangs beschriebene Zielkonflikt zwischen POIs und Arbeitsplätzen in der ÖPNV-Planung wird dadurch empirisch bestätigt.

5 FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wird ein praxisnahes Planungsproblem beschrieben, in die Literatur eingeordnet, eine Methodik zur Identifikation kritischer Verbindungen im ländlichen Raum vorgestellt sowie eine reale Fallstudie durchgeführt. Folgend sind die wesentlichen Beiträge dieses Beitrags zusammenfassend aufgeführt.

- ▶ *Methodik zur Identifikation kritischer Kanten:* Die in diesem Beitrag vorgestellte Methodik klassifiziert jede Verbindung zwischen zwei Orten nach ihrer Priorität hinsichtlich des Handlungsbedarfs zur Verbesserung des ÖPNV-Angebots.
- ▶ *Vergleich von ÖPNV-Angebot und Mobilitätsnachfrage:* Anders als die meisten bestehenden Erreichbarkeitsanalysen wird nicht nur das ÖPNV-Angebot bewertet, sondern auch der Mobilitätsnachfrage gegenübergestellt.
- ▶ *Berücksichtigung der Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen und POIs:* Die vorgestellte Methodik berücksichtigt sowohl die Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen als auch

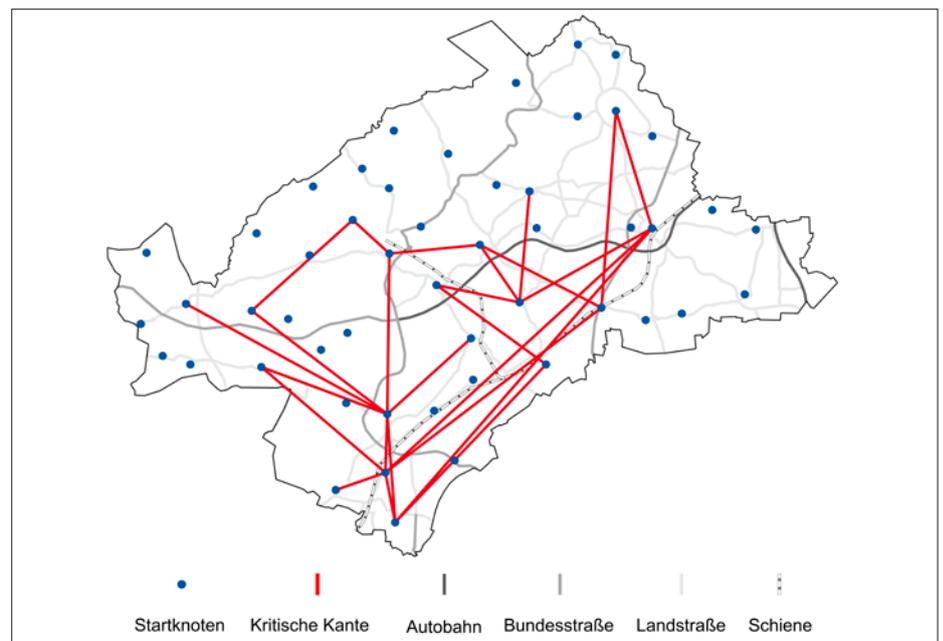


Abbildung 10: Darstellung der identifizierten kritischen Kanten zu POIs im Kreis Heinsberg (Land NRW 2019, eigene Darstellung)

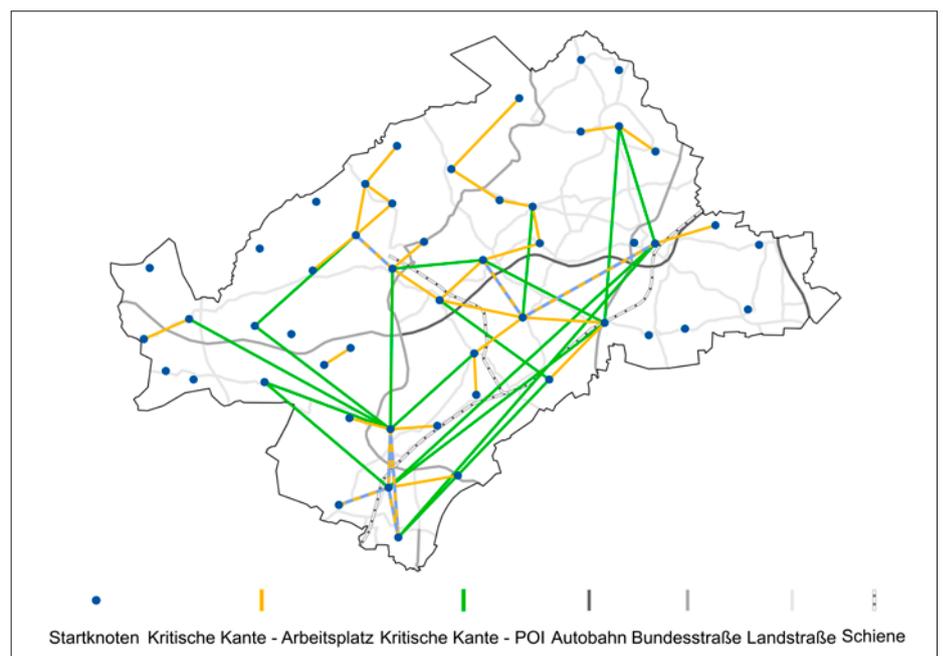


Abbildung 11: Vergleich der identifizierten kritischen Kanten zu Arbeitsplätzen und POIs (Land NRW 2019, eigene Darstellung)

von POIs. In der durchgeführten Fallstudie wurden kaum Überschneidungen in den identifizierten kritischen Verbindungen beider Perspektiven festgestellt.

- ▶ *Planungsgrundlage für Entscheidungsträger:* Durch die Anwendung der entwickelten Methodik wird Handlungsbedarf für den ÖPNV des untersuchten ländlichen Raums aufgezeigt. Auf Basis des Handlungsbedarfs können Entscheidungsträger die Mobilität im länd-

lichen Raum zielgerichtet weiterentwickeln, beispielsweise durch eine Einführung alternativer Buslinien sowie bedarfsorientierter Mobilitätskonzepte.

Limitationen der Methodik ergeben sich aus den zugrunde liegenden Annahmen. Die Verteilung der Bevölkerung und der Arbeitsplätze sowie die Nachfrage zu POIs werden diskretisiert. Eine kantengenaue Nachfrage zu Arbeitsplätzen kann lediglich antizipiert werden, basiert jedoch auf

realen punktbasierten Daten. Zudem müssen Grenzwerte für die Identifikation kritischer Kanten vorab auf politischer Ebene festgelegt werden. Weiterhin könnte die Fallstudie durch eine höhere Granularität zusätzliche Einblicke bringen, dies resultiert allerdings in einer höheren Modellkomplexität. Ebenso könnte eine Berücksichtigung von Pkw-Reisezeiten weitere Aufschlüsse hinsichtlich des Nutzerverhaltens und der Umwege des ÖPNVs bieten.

Zukünftige Forschungsvorhaben ergeben sich aus dem Ziel der aktiven Gestaltung ländlicher Mobilitätssysteme. Neben dem Ausbau des ÖPNV wird der Integration von On-Demand-Angeboten ein hohes Potenzial beigemessen. Hierfür müssen von der Forschung Instrumente zur Entscheidungsunterstützung entwickelt werden, die Standorte und Kapazitäten von multimodalen Mobilstationen sowie intermodale Routenführung in der Planung berücksichtigen. Die in diesem Beitrag entwickelte Methodik dient als Vorgehen zur Bestimmung von Eingangsdaten sowie als erster Planungsschritt zur Gestaltung innovativer Mobilitätssysteme im ländlichen Raum.

Danksagung

Die Arbeit ist im Rahmen des NRW Forschungskollegs ACCESS! erstellt worden. Das NRW Forschungskolleg ACCESS! wird vom Ministerium für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert.

Literatur

- Bwambale, A.; Choudhury, C. F.; Hess, S. (2019): Modelling trip generation using mobile phone data: A latent demographics approach. In: *Journal of Transport Geography*, 67, S. 276-286.
- Campbell, K. B.; Rising, J. A.; Klopp, J. M.; Mbilo, J. M. (2019): Accessibility across transport modes and residential developments in Nairobi. In: *Journal of Transport Geography*, 74, S. 77-90.
- Cui, B.; Boisjoly, G.; El-Geneidy, A.; Levinson, D. (2019): Accessibility and the journey to work through the lens of equity. In: *Journal of Transport Geography*, 74, S. 269-277.
- Deboosere, R.; El-Geneidy, A. (2018): Evaluating equity and accessibility to jobs by public transport across Canada. In: *Journal of Transport Geography*, 73, S. 54-63.
- Goliszek, S. (2017): Space-Time Variation of Accessibility to Jobs with used by Public Transport – A case study of Szczecin. In: *EUROPA XXI*, 33, S. 49-66.
- Google Maps (2019): Google Maps. <https://www.google.de/maps>.
- Google Maps Platform API (2019): Google Maps Platform. <https://cloud.google.com/maps-platform/>.
- Güngör, B. (2019): Analyse der Erreichbarkeit von Points of Interest im ländlichen Raum am Fallbeispiel des Kreises Heinsberg. RWTH Aachen University.
- Helders, F. (2019): Erreichbarkeitsanalyse im ländlichen Raum zur Identifikation von Standorten für Mobilstationen. RWTH Aachen University.
- Hernandez, D. (2018): Uneven mobilities, uneven opportunities: Social distribution of public transport accessibility to jobs and education in Montevideo. In: *Journal of Transport Geography*, 67, S. 119-125.
- Information und Technik Nordrhein-Westfalen, S. L. (2019): Landesdatenbank NRW. <https://www.landesdatenbank.nrw.de>.
- Iqbal, M.; Choudhury, C. F.; Wang, P.; González, M. (2014): Development of origin-destination matrices using mobile phone call data. In: *Transportation Research, Part C* 40, S. 63-74.
- IT.NRW (2018): Pendleratlas NRW. Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW), Geschäftsbereich Statistik. <https://www.pendleratlas.nrw.de/>.
- Kang, C.; Liu, Y.; Guo, D.; Qin, K. (2015): A Generalized Radiation Model for Human Mobility: Spatial Scale, Searching Direction and Trip Constraint. In: *PLoS One* 10 (11).
- Kim, J.; Lee, B. (2019): More than travel time: New accessibility index capturing the connectivity of transit services. In: *Journal of Transport Geography*, 78, S. 8-18.
- Land NRW (20019): OpenGeodata.NRW, dl-de/by-2-0, www.govdata.de/dl-de/by-2-0. www.opengeodata.nrw.de.
- Louis, B. (2004): Mobilität im Kanton St. Gallen. Amt für die Raumentwicklung und Geoinformation (Themenbericht 6 der Raumbearbeitung Kanton St. Gallen).
- Morgenroth, O. (2008): Zeit und Handeln. Psychologie der Zeitbewältigung. Kohlhammer, Stuttgart.
- Simini, F.; González, M. C.; Maritan, A.; Barabási, A.-L. (2012): A universal model for mobility and migration patterns. In: *Nature*, 484, S. 96-100.
- vote iT GmbH (2017): wahlen.regioit.de. https://wahlen.regioit.de/1/LW17/05370000/html5/Landtagswahl_NRW_69_Kreis_Kreis_Heinsberg_Erststimmen.html.
- Zeng, W.; Fu, C.-W.; Muller Arisona, S.; Schubiger, S.; Burkhard, R.; Ma, K.-L. (2017): Visualizing the Relationship Between Human Mobility and Points of Interest. In: *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, 18, S. 2271-2284.
- Zumkeller, D. (2005): Die intermodale Vernetzung von Personenverkehrsmitteln unter Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse (INVERMO). Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (TH).