

Makroskopisches Mobilitätsmodell zur Identifizierung von Energieeffizienzpotenzialen im ÖPNV

Lukas Spengler, Marius Madsen, Marc Gennat

SWK E² Institut für Energietechnik und Energiemanagement, Hochschule Niederrhein, Reinarzstraße 49, 47805 Krefeld, +49 2151 822 5122, lukas.spengler@hs-niederrhein.de, www.e2.hsnr.de

Gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, Förderkennzeichen 2021 22 114

Kurzfassung: Der Beitrag beschreibt eine Methodik zur Identifikation von Verbesserungspotenzialen im Verkehrssektor, indem spezifische Reisewiderstände als Bewertung des ÖPNV-Angebots dem Mobilitätsbedarf gegenübergestellt werden. Das Ergebnis ist eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Matrix mit einer Kennzahl für jede Relation zu jedem Zeitschritt im Betrachtungsgebiet.

Keywords: Energieeffizienz im Verkehr, ÖPNV, Mobilfunkdaten, Reisewiderstände

1 Einleitung

Um europäische und nationale Klimaziele im Verkehrssektor einhalten zu können, muss neben einer Antriebsenergie- und Mobilitätswende auch eine Modal Shift mittels Pull-Faktoren vom MIV zum Umweltverbund forciert werden. Im Jahr 2021 betrug der gesamte Primärenergieverbrauch des Verkehrssektors ca. 3.386 Petajoule, wovon 61 Prozent auf den Personenverkehr zurückzuführen sind [1]. Um das Verkehrsaufkommen und damit den Energiebedarf zu reduzieren, sollten Fahrzeuge effizienter genutzt und Mobilitätsbedarfe durch attraktive ÖPNV-Angebote gebündelt werden. Der Besetzungsgrad im MIV betrug in Deutschland 1,4 Personen pro Fahrzeug in 2017 [2].

Neben dem Modal Shift lässt sich zu Randzeiten und in Randgebieten auch die energetische und wirtschaftliche Effizienz durch einen Wechsel von Omnibus zu Kleinbus steigern. Elektrische 12-Meter Solobusse haben einen Stromverbrauch von ca. 1,4 bis 2,0 kWh/km [3]. Im Vergleich dazu hat ein VW ID. Buzz einen Verbrauch von 0,2 bis 0,3 kWh/km [4].

Sowohl aus energetischer als auch aus volkswirtschaftlicher Sicht sollte der MIV möglichst vollständig durch den ÖPNV ersetzt werden. Zudem sollte die Fahrzeugkapazität entsprechend des Bedarfes gewählt werden. Zu Randzeiten und in Randgebieten könnte ein flächendeckendes hochautomatisiertes Ridepooling-Angebot mit durchschnittlichen Besetzungsgraden von drei Personen pro Shuttle den Energieverbrauch signifikant senken.

Verkehrsbetreiber sind in der Lage Besetzungsgrade mit automatischen Fahrgastzählssystemen, wie z. B. Lichtschranken im Türbereich, zu erfassen und ein Überangebot vorhandener Linien zu identifizieren. Schwieriger ist es jedoch Relationen zu identifizieren, auf denen ein zusätzliches oder erweitertes Angebot sinnvoll ist. Hierfür ist eine Verkehrsstrommatrix erforderlich.

In diesem Beitrag wird ein makroskopisches Mobilitätsmodell am Beispiel der Stadt Krefeld vorgestellt, basierend auf [5]. Das Modell bewertet das vorhandene ÖPNV-Angebot durch Reisewiderstände und stellt diese dem Mobilitätsbedarf gegenüber, mit dem Ziel Energieeffizienzsteigerungspotenziale zu identifizieren.

2 Mobilitätsbedarf

2.1 Mobilfunkdaten

Für die Auswertung des Mobilitätsbedarfes wurden Mobilfunkdaten genutzt, die von der Firma Teralytics erworben wurden. Der Datensatz umfasst sämtliche Bewegungen von aktiven Mobilfunkkarten im Telefonica-Mobilfunknetz in den Monaten Juni 2022 bis Mai 2023. Die Anzahl der Reisen wird dabei in der Teralytics Matrix [6] je Postleitzahl auf die Gesamtbevölkerung hochgerechnet. Ausgegeben wird die Anzahl der Reisen zwischen beliebigen Verkehrszellen, die gruppiert werden können.

2.1.1 Annahmen und Vereinfachungen von Teralytics

Im Rahmen der Datenerhebung werden folgende Annahmen getroffen. Jede Person hat bei jeder Reise eine aktive Sim-Karte dabei. Personen mit zweitem Handy und Personen ohne Handy werden vernachlässigt. Es ist davon auszugehen, dass dadurch insbesondere Schüler, Kindergartenkinder und Senioren unterrepräsentiert sind und Berufstätige mit einem Firmenhandy überrepräsentiert. Es wird angenommen, dass das Mobilitätsverhalten von Telefonica-Kunden repräsentativ für Kunden anderer Mobilfunkanbieter ist.

Eine Reise endet, wenn sich länger als 30 Minuten in einer Teralytics-Zelle aufgehalten wird. Das führt zu einer fehlerhaften Trennung von Reisen, wenn z. B. die Weiterfahrt mit einer längeren Wartezeit verbunden ist. Insbesondere Bahnhöfe werden dadurch überdurchschnittlich häufig als Verkehrsziel gesetzt, obwohl der Bahnhof nicht das eigentliche Ziel ist. Analog ist der Bahnhof auch häufiger Startpunkt einer Reise, obwohl sie eigentlich woanders startete. Auf der anderen Seite werden Reisen fehlerhaft zusammengeführt, z. B. Hol- und Bring-Ziele oder Erledigungen mit kurzen Aufenthalten. Dadurch enden überrepräsentativ viele Wege wieder am Startpunkt, ohne dass das eigentliche Reiseziel im Datensatz aufgeführt ist.

2.1.2 Räumliche Eingrenzung

Über die Signalstärke zu umliegenden Funkmasten, kann nicht nur der aktuell genutzte Funkmast, sondern auch die Position des Mobilfunkkunden trianguliert werden. So können die Daten in mehr Verkehrszellen aufgeteilt werden als es Funkmasten gibt.

Für Krefeld liefert die kleinstmögliche Aufteilung in sogenannte Basiszonen 215 Verkehrszellen. Die Grenzen und Größen der Basiszonen orientieren sich dabei an den Grenzen der Postleitzahlen und der Bevölkerungsdichte, sodass es keine Verkehrszellen mit nur wenigen Einwohnern gibt. Um den Datenschutz zusätzlich sicher zu stellen wird die Gesamtzahl der exportierten Reisen je Zeitschritt (siehe 2.1.3) auf die nächste durch fünf teilbare Zahl gerundet und bei vier oder weniger Reisen auf null abgerundet.

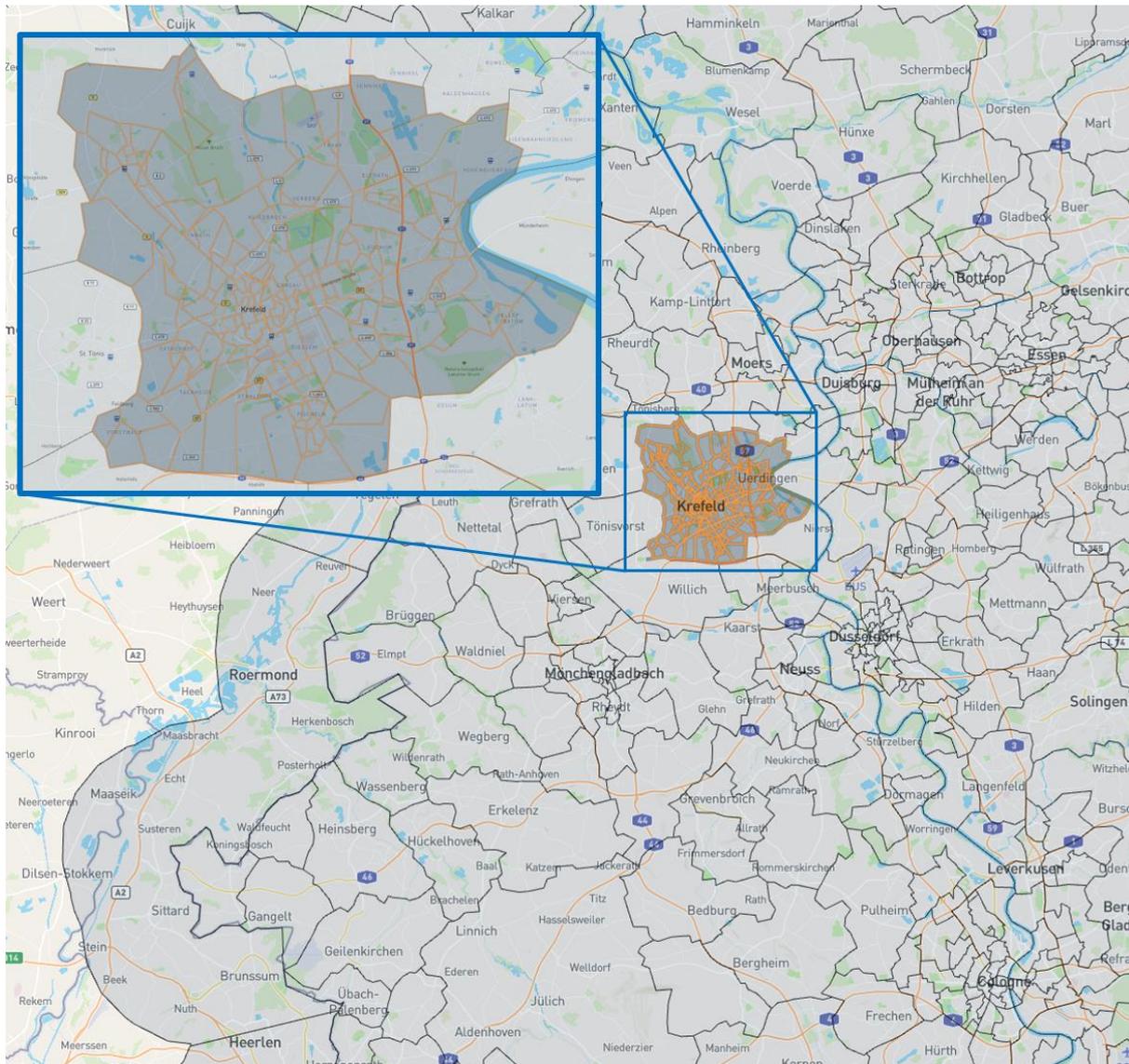


Abbildung 1: Screenshot der Verkehrszellen in Teralytics Matrix mit Krefeld in 215 Basiszonen und umliegende Gemeinden nach Postleitzahlen bzw. Landkreisen gruppiert, abhängig von der Anzahl der Reisen von und nach Krefeld [6]

Um die entstehenden Anonymisierungsfehler zu minimieren, werden die Basiszonen der umliegenden Gemeinden gruppiert. In Abhängigkeit der Anzahl der Reisen in diese Gemeinden werden sie in Postleitzahlen unterteilt oder zu Landkreisen zusammengefasst. Die Grenzwerte, ab wann welche Gruppierungsstufe gewählt wird, werden wie folgt angenommen und können in nachfolgenden Untersuchungen genauer beleuchtet werden:

- Bundesländer jeweils als eine Verkehrszelle
- NRW wird in Landkreise aufgeteilt
- Landkreis mit mehr als 20.000 Wegen pro Monat von und nach Krefeld werden in Gemeinden unterteilt
- Gemeinden mit mehr als 20.000 Wegen pro Monat von und nach Krefeld werden in Postleitzahlen unterteilt
- Krefeld wird in die von Teralytics Matrix vorgegebenen 215 Basiszonen unterteilt

Die resultierenden Verkehrszellen sind in Abbildung 1 dargestellt. Wege in Nachbarstaaten werden wie dargestellt als längliche Grenzgebiete vereinfacht.

Zudem wird Krefeld in einem zweiten Datenexport als Gemeinde zusammengefasst, um Anonymisierungsfehler zu minimieren. Die Differenz der Wege, zwischen Krefeld als Gemeinde und Krefeld unterteilt in Basiszonen, ist in Abbildung 2 in Rot dargestellt. Die Differenz wird anteilig auf die Wege der Basiszonen je Stunde addiert, um die Gesamtzahl der Wege beizubehalten.

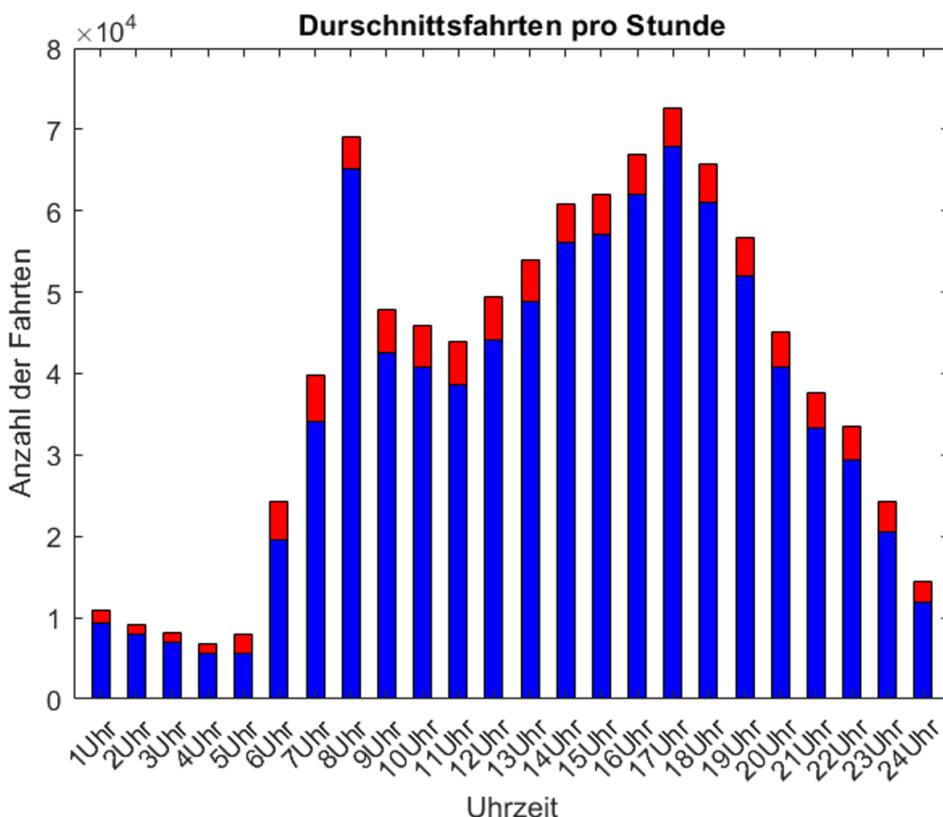


Abbildung 2: Anzahl der Reisen im Betrachtungsgebiet Krefeld mit Unterteilung in 215 Verkehrszellen (blau) und die Differenz zu Krefeld als eine Verkehrszelle (rot). Die Differenz entspricht den Anonymisierungsfehlern durch die Aufteilung in Basiszonen.

Im Folgenden werden nur Straßenbahnen und Bussen bewertet, die im Krefelder Stadtgebiet starten und enden. Das Angebot des Zugverkehrs innerhalb Krefelds wird zwar für die Reisewiderstände berücksichtigt, liegt aber nicht im Fokus der Auswertung. Um den Regionalverkehr zu bewerten sind größere Betrachtungsräume notwendig, was mit der gleichen Methodik und den gleichen Daten umsetzbar ist.

Alle Wege zu Verkehrszellen außerhalb von Krefeld werden geroutet und zu einer Schnittstelle am Stadtrand hinzugefügt, siehe Abbildung 3. Analog starten Wege von Verkehrszellen außerhalb Krefelds an diesen Schnittstellen.

Es wird zudem angenommen, dass Durchgangsverkehr mit Start und Ziel außerhalb Krefelds, nicht auf den Nahverkehr mit Straßenbahnen oder Bussen in Krefeld zurückgreift, sondern auf die aus der Bewertung ausgeschlossenen Regionalzüge. Somit wird nur Quell-, Ziel- und Binnenverkehr im Betrachtungsraum Krefeld in das makroskopische Verkehrsmodell übernommen.

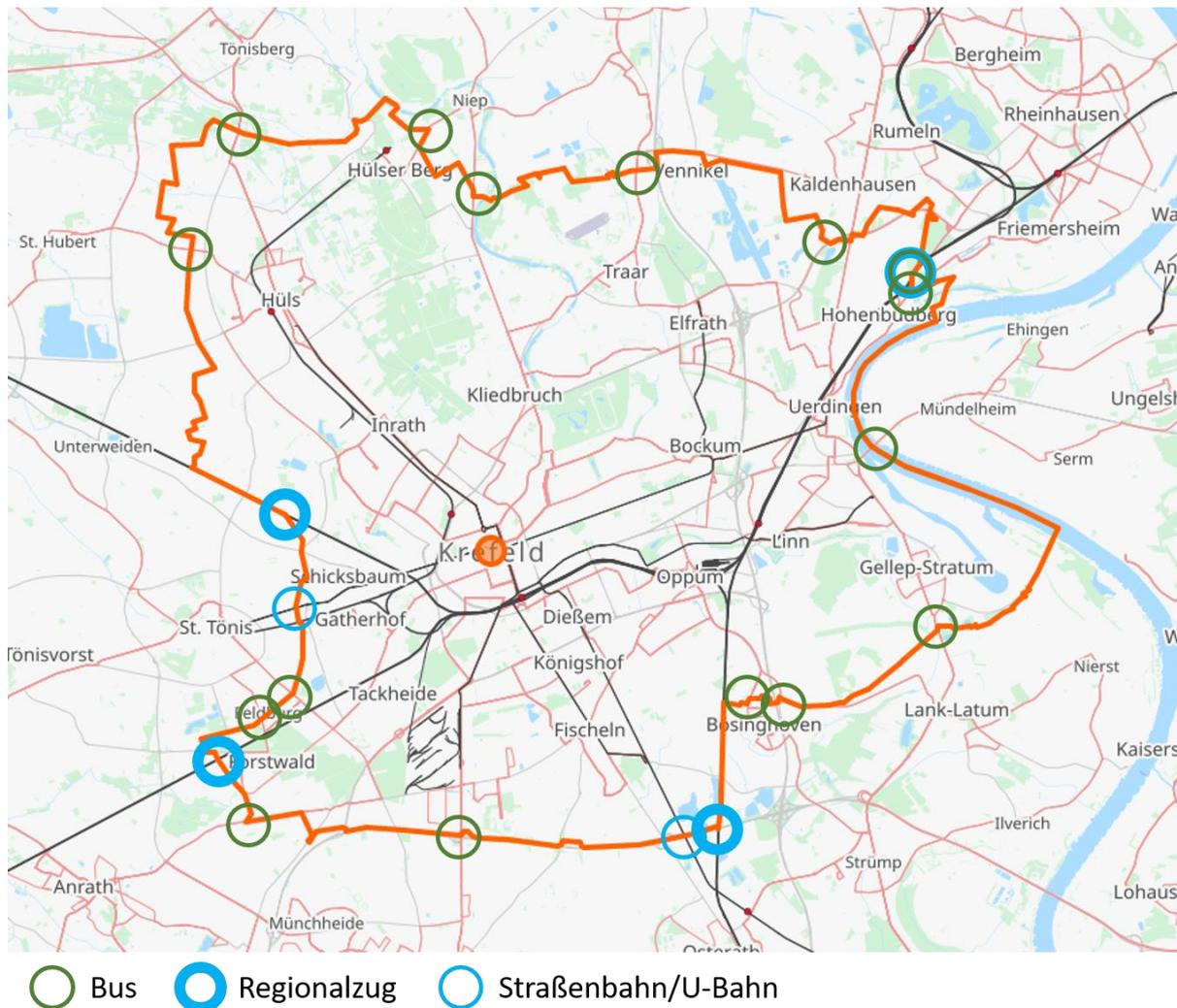


Abbildung 3: Überregionale Schnittstellen des ÖPNV-Routings nach ÖPNV-Verkehrsmittel

2.1.3 Zeitliche Eingrenzung

Die Rohdaten lassen sich neben den beschriebenen räumlichen Eingrenzungen auch zeitlich filtern. Für die folgende Auswertung werden alle Wege der vorliegenden 12 Monate summiert, die an den Wochentagen Montag, Dienstag, Mittwoch oder Donnerstag außerhalb der Schulferien in Nordrhein-Westfalen starteten und durch die entsprechende Anzahl der Tage geteilt. Dabei wird eine stündliche Auflösung unterschieden.

Es ergibt sich somit eine dreidimensionale Verkehrsstrommatrix mit der durchschnittlichen Anzahl an Wegen eines Standard-Werktages aufgelöst in 24 Zeitschritten.

2.2 Verkehrszellen

Für die nachfolgende Auswertung soll die räumliche Auflösung der Verkehrszellen so fein gewählt werden, dass Zu- und Abgangswege zum ÖPNV vernachlässigbar klein sind [7]. Hierfür ist ein Mittelpunktabstand von ca. 400 Metern gewählt worden. Daraus ergeben sich die in Abbildung 4 dargestellten 1023 Verkehrszellen.

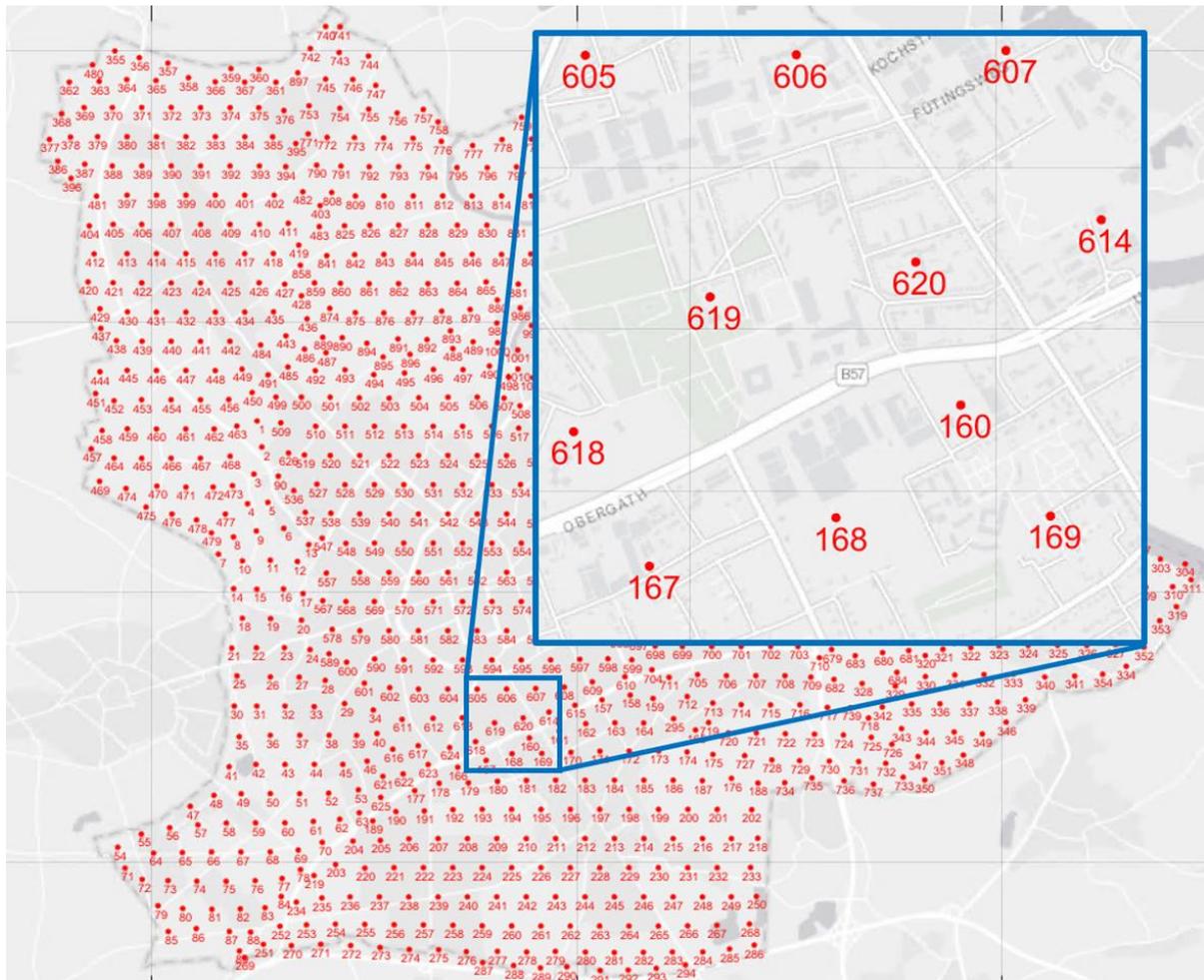


Abbildung 4: Mittelpunkte der 1023 Verkehrszellen in Krefeld im makroskopischen Modell; die Zellgrenzen ergeben sich mittels Voronoi-Zerlegung [7]

Die Verkehrsstrommatrix mit 215 Verkehrszellen von Teralytics wird in die 1023 Verkehrszellen des makroskopischen Modells transformiert. Aus den öffentlich verfügbaren Katasterdaten sind sämtliche Gebäudegrundflächen bekannt. Mit einem Gebäudehöhenmodell kann die Anzahl der Etagen und somit die Nutzfläche abgeschätzt werden [7]. Die Anzahl der Wege einer Teralytics-Verkehrszelle wird nun anteilig jedem Gebäude zugewiesen, entsprechend des Verhältnisses aus Nutzfläche des Gebäudes durch Gesamtnutzfläche in der Verkehrszelle. Hierbei liegt die vereinfachte Annahme zugrunde, dass alle Nutzflächen den gleichen Quell- und Zielverkehr auslösen.

In weiteren Untersuchungen können Gebäudenutzungsarten (Bildung, Wohnen, Einkauf, etc.), die ebenfalls in den Katasterdaten und zum Teil auch detailliert in OpenStreetMap unterschieden werden. Anhand der Mobilität in Deutschland-Studie ließe sich für jeden Regionaltyp abschätzen, wie sich die Anzahl der Wege auf die entsprechenden Mobilitätszwecke aufteilt [8].

Schließlich können die Gebäude den neuen Verkehrszellen zugeordnet und die entsprechenden Wege summiert werden. Es entsteht eine Verkehrsstrommatrix mit 1023 Startpunkten, 1023 Zielpunkten und 24 Zeitschritten. Nachfolgend werden die Mittelpunkte der Verkehrszellen als Referenzpunkte bezeichnet.

3 Mobilitätsangebot

3.1 Makroskopisches ÖPNV-Modell

Grundlage für das ÖPNV-Modell bilden öffentlich verfügbare Sollfahrplandaten im GTFS-Format [9]. An- und Abmarschwege sowie Fußwege beim Umsteigen werden mit OpenStreetMap (OSM) modelliert [10]. Die Grundstruktur bildet ein gerichteter und gewichteter Graph. Mit Referenzpunkten, Haltestellen und Kreuzungen als Knoten sowie Straßen und ÖPNV-Linien als Kanten. Für jeden Referenzpunkt und jede Haltestelle werden Lotfußpunkte auf der nächstgelegenen OSM-Kante bestimmt, um die Graphen zu verbinden und multimodale Wege zu routen. [5]

3.2 Reisewiderstände

Um die Qualität des ÖPNV-Angebots zu bewerten, spielen nicht nur Reisezeiten eine Rolle. Die Standardisierte Bewertung [11] zeigt hierfür Bewertungsmethoden auf, mit denen Unannehmlichkeiten durch Reisezeitäquivalente in Minuten beschrieben werden. So entsteht eine objektive Bewertung der für die Verkehrsmittelwahl entscheidenden Umstände.

Ein Algorithmus zur Bestimmung des zeitabhängigen Reisewiderstands zwischen zwei Punkten befindet sich zurzeit im Veröffentlichungsprozess [12]. Dieser Algorithmus berechnet für jede Relation in minütlicher Auflösung, also 1440 Zeitschritten, einen Reisewiderstand und eine Reisezeit. Da die Mobilfunkdaten in stündlicher Auflösung vorliegen, wird zunächst vereinfacht angenommen, dass die Personen stets den minimalen Reisewiderstand innerhalb dieser Stunde wählen. Das führt zur Aufwertung von Linien, die nur im Stundentakt fahren, daher soll in nachfolgenden Untersuchungen stattdessen der Mobilitätsbedarf mit Datensätzen, wie z. B. [8], zeitlich feiner aufgelöst werden und der Reisewiderstand innerhalb bestimmter Abfahrtszeitfenster zugeordnet werden.

4 Gegenüberstellung von Angebot und Bedarf

Um kurze und lange Distanzen zu bewerten, wird der ÖPNV-Reisewiderstand jeder Relation durch deren Luftlinienabstand dividiert. Alternativ kann er auch auf den MIV-Reisewiderstand bezogen werden. Aus dem resultierenden spezifischen Reisewiderstand in Minuten pro Kilometer-Luftlinie und dem Mobilitätsbedarf in Personen pro Stunde wird eine Kennzahl anhand der Tabelle 1 ermittelt. Diese Kennzahl gibt an, ob eine bestimmte Relation näher betrachtet werden soll. Dabei stehen negative Werte für ein potenzielles Überangebot (blau) und positive Werte für ein mögliches Ausweitungspotenzial bzw. Unterangebot (rot).

Für die Einordnung der Ergebnisse sind die gewählten Grenzwerte zwischen den Zeilen bzw. Spalten der Tabelle entscheidend. Durch eine Anpassung dieser Grenzwerte verschieben sich die in Kapitel 5 dargestellten Farbverläufe entsprechend.

		Mobilitätsbedarf [Pers./h]						
		0	1,5	3	4,5	6	>7,5	
Spezifischer Widerstand [min/km]	0	0	1	2	3	4	5	
	3	0	-12	-9	-6	-3	-1	0
	6	1	-9	-5	-2	-1	0	1
	9	2	-6	-2	0	0	1	3
	12	3	-3	-1	0	0	2	6
	> 15	4	-1	0	1	2	5	9
	5	0	1	3	6	9	12	

Tabelle 1: Bewertungsmatrix, zur Bewertung des Über- bzw. Unterangebots einer Relation in Abhängigkeit des spezifischen Reisewiderstands [Minuten pro Luftlinien-Kilometer] und Mobilitätsbedarfs [Personen pro Stunde]

5 Ergebnis

Die Kennzahlen werden als dreidimensionale Matrix mit den gleichen Dimensionen wie die Eingangsmatrizen ausgegeben und können wie in Abbildung 5 grafisch dargestellt werden. Sie dienen als Grundlage für detailliertere Betrachtungen durch Mobilitätsanbieter oder Aufgabenträger. Es werden die Strecken mit dem größten Potenzial zur Angebotsausweitung bzw. -reduzierung identifiziert. Ob das Angebot hier aber wirklich angepasst werden soll, kann die aufgezeigte Methodik nicht nachweisen, da es Einflussfaktoren gibt, die hier nicht berücksichtigt werden können. Da die Relationen einzeln bewertet werden, kann es zum Beispiel sein, dass eine Verbindung von einer Verkehrszelle am Stadtrand zum gegenüberliegenden Stadtrand hohe negative Werte aufweist, da hier in einem sternförmig angeordneten ÖPNV-System der Widerstand gering ausfällt, aber kaum Personen von Stadtrand zu Stadtrand fahren möchten, sondern bereits im Zentrum aussteigen. Dafür steigen im Zentrum Personen ein und fahren zum Stadtrand weiter, sodass der hier angebotene Linienverkehr durchaus effizient ist und die Besetzungsgrade erreicht werden.

Im vorliegenden Beispiel in Abbildung 5 sind alle Wege an einem Standardwerktag zwischen 9 und 10 Uhr die im Postleitzahlengebiet 47804 (grün markiert) starten und in Krefeld enden dargestellt. Überregionaler Verkehr ist in diesem Beispiel ausgeblendet.

Im oberen Bild sind alle Relationen markiert, die länger als einen Kilometer sind und nach Tabelle 1 eine Kennzahl größer null aufweisen. Eine hohe Kennzahl (dickere und dunklere Linie) haben hier nur zwei Relationen. Obwohl es sich um relativ zentrale Verbindungen handelt, ist der spezifische Reisewiderstand vergleichsweise hoch, da die Relationen nicht parallel zu Bus und Straßenbahn-Linien verlaufen, sondern in einem gewissen Winkel. Wäre der Winkel größer, könnte eine ergänzende Tangentialverbindung sinnvoll sein. Das ist hier allerdings, zumindest zu dem dargestellten Zeitintervall zwischen 9 und 10 Uhr, nicht der Fall. Dafür könnte ein flächendeckender Mobility on Demand Service mit kleinen Fahrzeugkapazitäten diese Mobilitätsbedarfe decken.



Abbildung 5: Ergebnisauszug: Bewertete Relationen mit Start im PLZ-Gebiet 47804 (grün) und Ziel in Krefeld zwischen 9 und 10 Uhr. Oben in Rot: viele Personen, hoher Widerstand; Unten in Blau: wenig Personen, geringer Widerstand.

Im unteren Bild ist zu erkennen, dass es einige Verbindungen gibt, die einen geringen Reisewiderstand aufweisen, allerdings auf diesen Relationen wenig bis keine Personen unterwegs sind. Das bedeutet aber nicht zwingend, dass die Fahrzeuge fast leer sind. In diesem Fall sind es Verbindungen, die über das Stadtzentrum führen und auf der anderen Seite der Stadt enden. Die meisten Personen aus dem grün markierten Betrachtungsgebiet steigen im Stadtzentrum aus, dafür steigen andere dort ein und der Besetzungsgrad kann trotz schlechter Kennzahl hoch sein. Die Besetzungsgrade sind hier zu prüfen. Insbesondere die Straßenbahnen sorgen in diesem Beispiel für geringe Reisewiderstände.

6 Diskussion

Es wurden einige Vereinfachungen getroffen und beschrieben, die durch vertiefende Analysen begründet und ggf. angepasst werden müssen. Insbesondere die Aufteilung der Reisen von den Teralytics-Verkehrszellen auf die uniformen Verkehrszellen ist fehlerbehaftet, da hier aktuell alle Nutzflächen gleich gewichtet sind und eine Lagerhalle eine andere Verkehrserzeugung aufweist, als ein Supermarkt oder Wohnhaus. Da die Teralytics-Verkehrszellen aber mit 215 Verkehrszellen im Krefelder Stadtgebiet bereits eine gute räumliche Auflösung aufweisen, sind die grundsätzlichen Erkenntnisse in Kapitel 5 aussagekräftig.

Um ein Mobilitätskonzept zu finden, dass die aufgezeigten Potenziale hebt, ist eine Optimierung des makroskopischen Verkehrsmodells erforderlich, wie es [5] beschreibt.

Referenzen

- [1] Umweltbundesamt. "Energieverbrauch und Kraftstoffe." <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#kraftstoffe-dominieren> (accessed 23.11.2023).
- [2] B. f. V. u. d. Infrastruktur, "Mobilität in Deutschland - Zeitreihenbericht 2002 - 2008 - 2017," 2019. [Online]. Available: https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Zeitreihenbericht_2002_2008_2017.pdf
- [3] M. Benz. "DER eCITARO - Alle technischen Daten und Ausstattungen im Überblick." https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/models/ecitaro/facts/facts-ecitaro.pdf (accessed 25.11.2023).
- [4] Volkswagen. "ID. Buzz - Technische Daten." <https://www.volkswagen-nutzfahrzeuge.de/de/modelle/id-buzz/technische-daten.html> (accessed 25.11.2023).
- [5] L. Spengler et al., "From Modeling to Optimizing Sustainable Public Transport: A New Methodological Approach," *Sustainability*, vol. 15, no. 10, p. 8171, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/10/8171>.
- [6] Teralytics. <https://teralytics.net/matrix/> (accessed 17.01.2024).
- [7] L. S. Marius Madsen, Marc Gennat, "Modellierung der Verkehrsnachfrage zur Entwicklung von Energieeffizienten Mobilitätsangeboten," in 18. Symposium Energieinnovation 2024, Graz, 2024: im Veröffentlichungsprozess.
- [8] B. f. V. u. d. Infrastruktur, "Mobilität in Deutschland 2017 - Ergebnisbericht," infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, 2019. [Online]. Available: https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf
- [9] I. O. ÖPNV. "Sollfahrplandaten." <https://www.opendata-oepnv.de/ht/de/datensaetze> (accessed 17.01.2024).
- [10] L. Spengler and M. Gennat, "Fahrzeitermittlung im städtischen Raum mittels Google API," in *Making Connected Mobility Work: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*, H. Proff Ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, pp. 839-853.
- [11] V. I. S. G. Intraplan Consult GmbH, "Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen im öffentlichen Personennahverkehr," 2023. [Online]. Available: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-schienepersonenverkehr/gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz-gvfg.html>
- [12] L. S. Marc Gennat, "Time-Dependent Shortest Path with Travel Time Equivalents of Inconveniences," in *Operations Research 2023*, Hamburg, 2023: im Veröffentlichungsprozess.