

ENTWICKLUNG EINER QUELLE-ZIEL-ZEIT-MATRIX AUF BASIS FREIER DATENQUELLEN ALS PLANUNGSGRUNDLAGE FÜR EINE ENERGIEEFFIZIENTERE MOBILITÄT

Marius Madsen, Lukas Spengler, Marc Gennat

Hochschule Niederrhein, SWK E² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement,
Reinarzstr. 49, 47805 Krefeld, Germany, +49 2151822 6697, marius.madsen@hs-niederrhein.de, www.hs-niederrhein.de/swk-e2

Kurzfassung: Die Optimierung und Simulation energieeffizienterer Verkehrsangebote erfordert eine gute Kenntnis über die Verkehrsnachfrage. In dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, mit der auf Basis frei zugänglicher Daten eine räumlich hochaufgelöste Verkehrsstrommatrix abgeschätzt werden kann.

Keywords: Mobilität, ÖPNV, Open Data, Verkehrsstrommatrix

1 Einleitung

Der Straßenverkehr war im Jahr 2018 in der Europäischen Union für 26 Prozent aller CO₂-Emissionen verantwortlich [3]. Energieeffiziente und umweltfreundliche Mobilität wirkt sich daher unmittelbar positiv und signifikant auf die Klimabilanz aus. Für eine Simulation und Optimierung von Verkehrssystemen, wie Straßenverkehr und ÖPNV, ist die Kenntnis der Wege von Verkehrserzeugern zu Senken in Abhängigkeit von Uhrzeit und Verkehrsmittel notwendig [1]. In [10] wurde ein Verfahren vorgestellt, mit welchem eine statische Quelle-Ziel-Matrix auf Basis frei zugänglicher Datenquellen erzeugt werden kann, wobei die Quelle nur sehr grob abgeschätzt werden konnte. Auf [11] wurde eine Idee vorgestellt, wie dieses Verfahren um eine Zeitkomponente erweitert werden kann.

Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, um eine solche dreidimensionale dynamische Quelle-Ziel-Matrix komplett auf Basis frei zugänglicher Datenquellen abschätzen zu können. Die jeweiligen Quellen aller Wege können ebenfalls aus diesen Datenquellen statistisch abgeschätzt werden.

1.1 400 Meter-Rasterung

Die Methode wird am Beispiel der Stadt Krefeld (NRW, Deutschland) vorgestellt. Das Stadtgebiet umfasst 138 Quadratkilometer und ist in 19 Stadtteile und 45 statistische Bezirke aufgeteilt. Zur Diskretisierung des Stadtgebietes in Verkehrszellen schlägt [9] für eine Stadt wie Krefeld, mit etwa 225.000 Einwohnern, als Orientierung etwa 275 Verkehrszellen vor. Jedoch weist [9] auch darauf hin, dass eine feinere Rasterung notwendig ist, wenn die Verkehrsaufteilung auf alle Verkehrsarten hin untersucht werden soll. Um das Stadtgebiet numerisch gut abzubilden, wird dieses in ein 400 Meter x 400 Meter-Zellen diskretisiert. Damit ergibt sich eine Einteilung des Stadtgebietes in 794 Verkehrszellen.

Jeder tatsächliche Start- und Zielpunkt eines Weges kann einer Zelle zugeordnet werden. Daraus resultieren 630.436 mögliche innerstädtische Wegverbindungen zwischen diesen

Zellen. Die Mittelpunkte dieser Zellen in den statistischen Bezirken sind in folgender Grafik dargestellt.

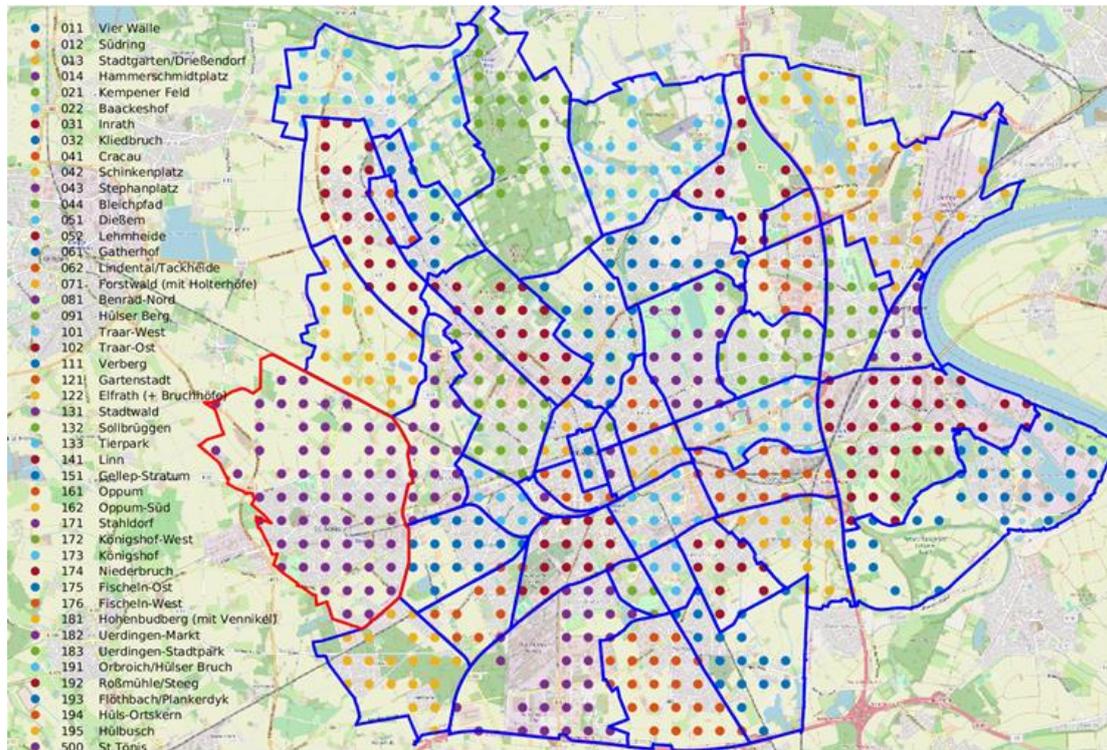


Abbildung 1: Diskretisierung des Krefelder Stadtgebietes in Verkehrszellen

1.2 Datenquellen

In Deutschland sind seit 2015 die Liegenschaftskataster aller Bundesländer frei nutzbar [6]. Im Liegenschaftskataster der Stadt Krefeld sind 145.143 Gebäude mit Angaben zur Grundfläche, Etagenanzahl und 253 unterschiedlichen Gebäudefunktionen, wie zum Beispiel „Bürogebäude“ oder „Wohnhaus“, enthalten [5].

Außerdem, müssen Daten vorliegen, aus denen hervorgeht, wie viele Wege zwischen einzelnen Stadtteilen oder Bezirken stattfinden, wie sich Wege zeitlich über den Tag verteilen und welche Reisezwecke (Heimweg, Arbeiten, Einkaufen, etc.) dabei zugeordnet sind. Für die Stadt Krefeld liegen diese Daten in Form einer Mobilitätsbefragung vor [1].

Außerdem werden statistische Informationen über die Bevölkerung eingearbeitet. Für Krefeld liegen diese Daten als „Bezirksatlas“ vor [4].

2 Methode

Der Ansatz besteht im Wesentlichen in der Verknüpfung des Liegenschaftskatasters [5] mit den Ergebnissen einer durchgeführten Verkehrsbefragung [2]. Hierzu werden die 253 unterschiedlichen Gebäudefunktionen, von denen je eine Gebäudefunktion einem jeden Gebäude zugeordnet ist, in zehn vereinfachte Gebäudefunktionen (Arbeiten, Einkaufen, etc.), analog zu den Wegezwecken (Arbeitsweg, Einkaufsweg, etc.) zusammengefasst. Gebäude mit hybriden Gebäudefunktionen (z. B. „Wohngebäude mit Handel und Dienstleistungen“) werden anteilig zugeordnet. Im Folgenden wird näherungsweise angenommen, dass ein Weg

immer von einem Gebäude zu einem anderen stattfindet. Zur Vereinfachung werden alle Gebäudeflächen einer vereinfachten Gebäudefunktion innerhalb einer Verkehrszelle zusammengefasst (siehe Abbildung 2).

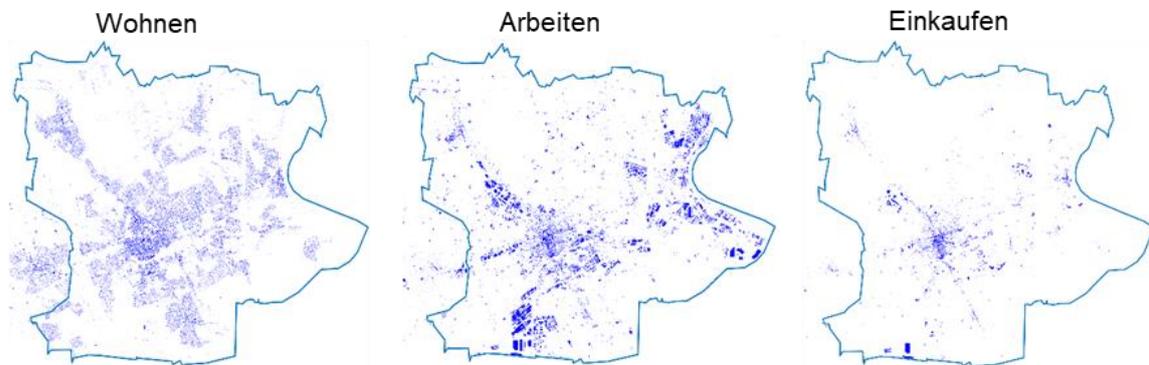


Abbildung 2: Aufteilung auf vereinfachte Gebäudefunktionen (Beispielhaft: Wohnen, Arbeiten und Einkaufen)

2.1 Verkehrserzeugungsmodell

Durch die Verkehrsbefragung [2] ist bekannt, wie viele werktägliche Wege innerhalb Krefelds stattfinden. Die Verteilung der Startpunkte dieser Wege auf die einzelnen Verkehrszellen erfolgt in einem vereinfachten Raumaggregatmodell in Anlehnung an [13], wobei in dieser Arbeit die Verkehrserzeugung der Verkehrszellen je Wegezweck anhand der aggregierten Gebäudeflächen einer Gebäudefunktion zugeteilt wird. Nur die Verkehrserzeugung die von Wohngebäuden ausgeht wird bei der Stadtteil-zu-Stadtteil-Betrachtung nicht anhand der Gebäudefläche gewichtet, sondern anhand der Einwohneranzahl der Stadtteile. Die Verteilung auf einzelne Verkehrszellen erfolgt wieder über die Wohngebäudeflächen, da hier keine empirischen Daten vorliegen.

Dazu muss bestimmt werden, welcher Wegezweck bei welcher Gebäudefunktion beginnt. Zum Beispiel muss ein „Arbeitsweg“ nicht bei einem „Wohnen“-Gebäude beginnen, wenn vor der Arbeit z. B. noch ein Arztbesuch („Besorgungen“) stattfindet. Auch jede andere Kombination von Quelle und Ziel ist denkbar. Eine Ausnahme stellt hier der Wegezweck „geschäftlich unterwegs“ dar. Dieser beginnt (und endet) in dieser Modellierung immer bei einem Gebäude mit der Kategorie „Arbeiten“.

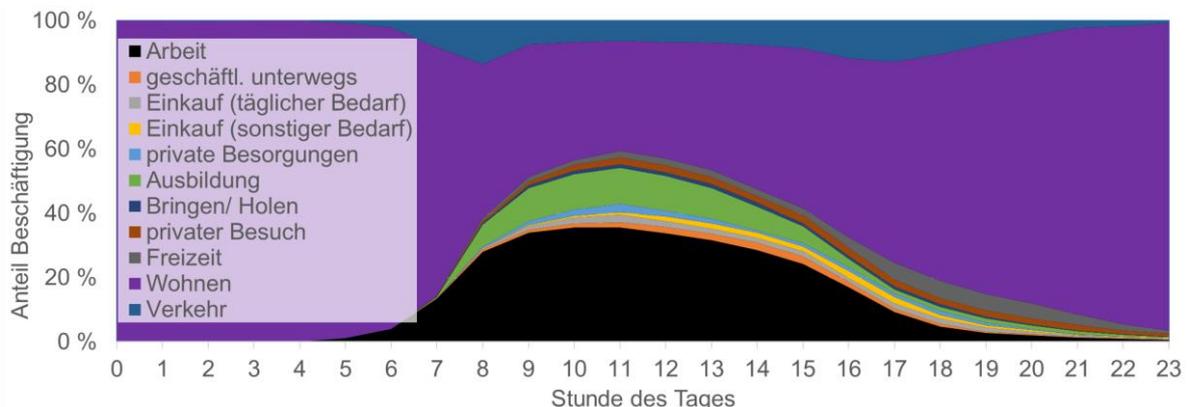


Abbildung 3: Tageszeitliche Beschäftigung der Krefelder Bevölkerung [2]

Durch die vorliegende Verkehrsbefragung [2] ist die tageszeitliche Beschäftigung (siehe Abbildung 3) bekannt und wird zur Abschätzung der Quelle von Wegen herangezogen und mit den vereinfachten Gebäudekategorien verknüpft.

Durch die Abbildung 3 wird erkennbar, dass die Quelle eines Weges stark uhrzeitabhängig ist. Daher wird die Quelle eines Weges je nach Uhrzeit anhand der Daten aus Abbildung 3 gewichtet.

Somit liegt ein zeitlich aufgelöstes Verkehrserzeugungsmodell für alle Verkehrszellen vor.

2.2 Verkehrszielwahlmodell

Durch die Informationen über die Anteile des Reisezwecks (siehe [2]) und der Anzahl aller Wege liegt eine empirische Datengrundlage für ein Verkehrszielwahlmodell vor.

Tabella 1: Reisezweckverteilung

k	Reisezweck	Anteil
1	Arbeitsweg	18,3%
2	Einkaufen (tägliches Bedarf)	6,9%
3	Einkaufen (sonstiger Bedarf)	4,9%
4	Besorgungen (Arzt, Bank, etc.)	5,1%
5	Ausbildung	5,8%
6	Freizeit	8,3%
7	Heimwege und priv. Besuche	50,8%

2.2.1 Erste Näherung durch Vorwärtsrechnung

Es werden die kumulierten Nutzflächen einer Gebäudekategorie der jeweiligen Zellen in derer die Gebäude stehen zugeordnet. Durch eine einfache Vorwärtsrechnung ist es nun möglich, die Anzahl aller Wege einer Uhrzeit mit einem Reisezweck (z. B. „Einkaufen“) den zugeordneten Flächen („Einkaufen“) und damit den einzelnen Zelle-zu-Zelle-Relationen der Stadt zuzuweisen.

Um die Anzahl der Wege eines Wegezwecks mit der Gebäudefläche eines Gebäudes mit der passenden Gebäudefunktion in Relation zu bringen, wird der Vektor $x_{k,d}$, der aussagt wie viele Wege eines Reisezwecks k in einen Stadtteil d führt, für jede Kombination aus Stadtteil d und Wegezweck k eingeführt. Um die Anzahl der Wege eines Wegezwecks in einen Stadtteil zu ermitteln, soll die dazugehörige Komponente des Vektors mit der Gebäudefläche multipliziert werden. Da in erster Näherung angenommen wird, dass ein Quadratmeter einer spezifischen Gebäudefunktion immer gleich viele Wege verursacht, kann die Wegeverteilung $b_{k,d}$ für jeden Reisezweck k und jeden Stadtteil d abgeschätzt werden. $a_{k,d}$ ist hierbei die dem Reisezweck k zugeteilte Fläche a innerhalb eines Stadtteils d .

$$b_{k,d} = \frac{a_{k,d}}{a_{\Sigma,k}} \tilde{b}_k \cdot w_{\Sigma} \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \cap d \in \{1, \dots, D\} \quad (1)$$

2.2.2 Nebenbedingungen

Durch die Daten der Mobilitätsbefragung ist ebenfalls bekannt, wie viele Wege eines Tages in jeden Stadtteil führen. Diese Verflechtungsmatrix ist in Abbildung 4 dargestellt.

nach von	Hüls	Hülser Berg	Traar	Verberg	Gartenstadt	Uerdingen	Bockum
Hüls	23.600	590	410	170	430	840	1.190
Hülser Berg	590	0	170	210	0	260	150
Traar	600	170	2.860	390	270	890	870
Verberg	170	210	310	240	130	480	390
Gartenstadt	540	0	460	70	2.170	2.950	850
Uerdingen	570	100	1.230	480	3.160	22.970	5.500
Bockum	1.240	150	620	390	950	5.800	22.140
Inrath/Kliedbruch	2.340	100	780	1.090	480	1.890	5.020
Kempener Feld/Baackeshof	1.570	160	290	150	390	680	1.760
Bessard Nord	0	0	0	0	110	150	70

Abbildung 4: Auszug aus Verflechtungsmatrix [2]

Diese Verflechtungsmatrix wird durch die einfache Vorwärtsrechnung teilweise verletzt. Dies wurde erwartet, da die ideelle Verteilung der Wege auf die Gebäudeflächen nur eine Näherung darstellt.

Um ein Ergebnis zu erhalten, welches diese Nebenbedingung einhält, ist ein Parameterschätzverfahren erforderlich. Für das Parameterschätzverfahren werden die folgenden Nebenbedingungen notiert.

Da alle Gebäudeflächen und die Anzahl der Einwohner immer positiv sind, können negative Fahrten für alle Reisezwecke K und alle Ziel-Stadtteile D ausgeschlossen werden.

$$x_{k,d} \geq 0 \quad \forall k \in \{1,2, \dots, K\} \cap d \in \{1,2, \dots, D\} \quad (2)$$

Als weitere Nebenbedingung muss die Summe der Wege über alle Reisezwecke in einen Stadtteil d der Anzahl aller Wege w_d der Mobilitätsbefragung entsprechen, die in den Stadtteil hineinführen (siehe Abbildung 4), was durch

$$\sum_{k=1}^K a_{k,d} \cdot x_{k,d} = w_d \quad \forall d \in \{1, \dots, D\} \quad (3)$$

beschrieben werden kann. Die Einhaltung der zeitlich gemittelten Reisezweckverteilung \tilde{b}_k für die Gesamtstadt aus [2] muss als zusätzliche Nebenbedingung mit

$$\sum_{d=1}^D a_{k,d} \cdot x_{k,d} = \tilde{b}_k \cdot w_\Sigma \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (4)$$

eingeführt werden. Diese Nebenbedingungen werden in Anlehnung an [20] vektor- bzw. matrixenweise spezifiziert mit A_{eq} , b_{eq} , lb und ub .

2.2.3 Bestimmung der Quelle-Ziel-Zeit-Matrix unter Nebenbedingungen

Als Parameterschätzverfahren wird die Methode der kleinsten Quadrate [21] mit der Kostenfunktion

$$c(\mathbf{X}) = \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D (a_{k,d} \cdot x_{k,d} - b_{k,d})^2 \quad (5)$$

verwendet. Die oben eingeführten Nebenbedingungen müssen durch die Zielfunktion

$$J^* = \min_{\mathbf{X}} c(\mathbf{X}) \quad \text{mit} \quad \mathbf{X}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{X}} c(\mathbf{X}) \quad (6)$$

berücksichtigt werden. Für den Stadtteil-zu-Stadtteil-Verkehr kann somit eine Quelle-Ziel-Reisezweck-Matrix berechnet werden, die die Nebenbedingungen einhält.

2.3 Datenaufbereitung

Um eine zeitliche Komponente einzuführen und eine höhere räumliche Auflösung zu erreichen ist eine Nachbearbeitung der Daten erforderlich.

2.3.1 Verteilung der Wege auf einzelne Verkehrszellen

Um die ermittelte Quelle-Ziel-Reisezweck-Matrix vom Stadtteil-zu-Stadtteil-Verkehr auf Verkehrszelle-zu-Verkehrszelle-Relationen umzurechnen werden die einzelnen Wege je nach Reisezweck k mit den zugeordneten Gebäudeflächen $\tilde{a}_{i,k}$ auf die einzelnen Verkehrszellen i gewichtet zugeteilt mit

$$\tilde{x}_{i,k} = \tilde{a}_{i,k} \cdot x_{k,d} \quad \forall i \in \{1, \dots, 794\} \cap k \in \{1, \dots, K\} \cap d \in \{1, \dots, D\} \quad (7)$$

Dabei ist jede Verkehrszelle i einem Stadtteil d zugeordnet und jedes Ziel eines Weges $\tilde{x}_{i,k}$ einer Verkehrszelle i und einem Reisezweck k .

2.3.2 Übertragung einer zeitlichen Verteilung auf die Quelle-Ziel-Matrix

Durch die die tageszeitliche Verteilung des Verkehrs nach Reisezweck (siehe Abbildung 5), liegt eine empirische Datengrundlage für ein dynamisches Verkehrszielwahlmodell vor.

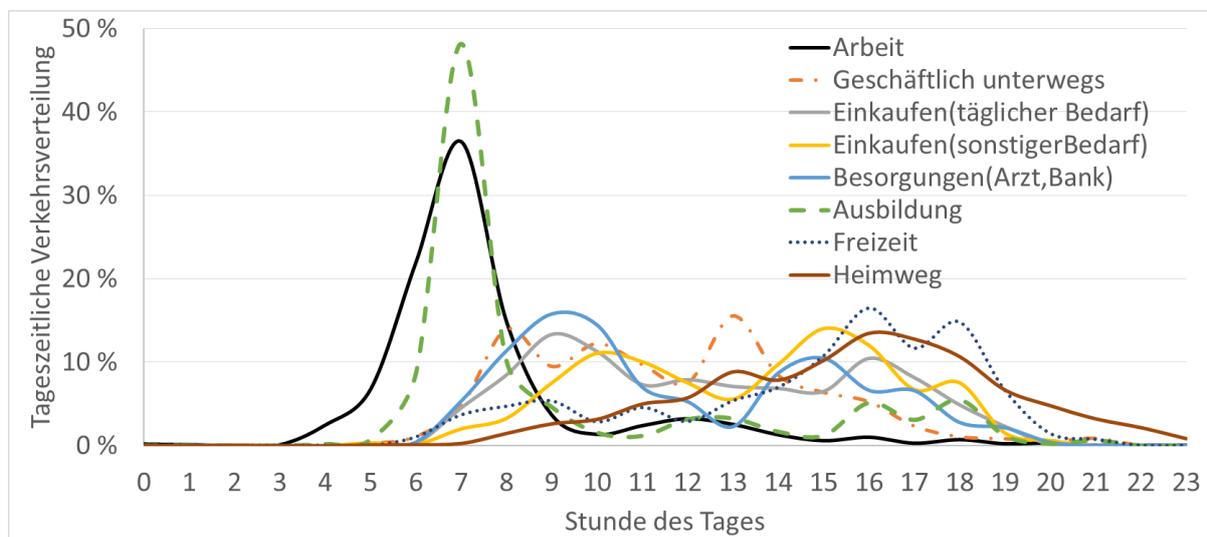


Abbildung 5: Tageszeitliche Verteilung des Verkehrs nach Reisezweck [2]

Die zeitliche Verteilung der Wege des Reisezwecks k kann somit für jede Stunde h des gesamten Tages mit

$$\hat{x}_{i,k,h} = d_{h,k} \cdot \tilde{x}_{i,k} \quad \forall h = \{1, \dots, 24\} \quad (8)$$

durch einfache Vorwärtsrechnung erfolgen. Dabei ist $d_{h,k}$ die tageszeitliche Verteilung des Reisezwecks und $\tilde{x}_{i,k}$ repräsentiert die ankommenden Wege in der Verkehrszelle i mit Reisezweck k .

3 Ergebnis

Durch die Verknüpfung des Verkehrserzeugungsmodells mit dem Verkehrszielwahlmodell liegt eine Quelle-Ziel-Zeit-Reisezweck-Matrix für 630.436 Verkehrszelle-zu-Verkehrszelle-Relationen vor, mit der die energieeffiziente Mobilität der Zukunft geplant werden kann. In der Abbildung 6 ist beispielhaft die zeitliche Verteilung und Wegezweckerteilung aller Wege von der Verkehrszelle 1 (Innenstadt) zur Verkehrszelle 600 (Stadtteil Fischeln; Wohngebiet mit Schule) dargestellt.

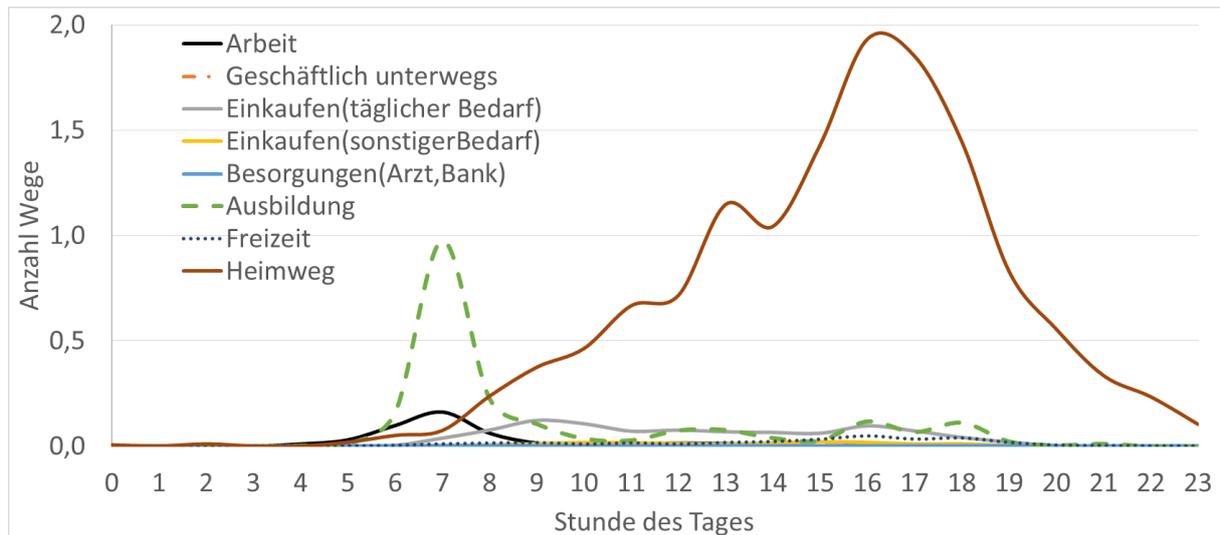


Abbildung 6: Beispielhaftes Ergebnis für Wege der Zelle 1 zur Zelle 600

Da Arbeitswege tendenziell eher in die Zelle 1 als in die Zelle 600 führen bleibt die in Abbildung 5 dargestellte morgendliche Spitze der Arbeitswege in Abbildung 5 aus. Der Verlauf in Abbildung 6 wird durch die Heimwege am Nachmittag dominiert, was plausibel ist, da die Verkehrszelle 600 durch Wohngebäude geprägt ist.

Die vorgestellte Methode zeigt den Ansatz zur Berechnung der räumlich-zeitlichen Reisezweckverteilung allein auf Basis frei zugänglicher Daten, die mit einem Parameterschätzverfahren verknüpft werden konnten. Diese Methode könnte mit Modellierungs- und Messfehlern behaftet sein, die sich ohne weitere Daten (z. B. einer detaillierteren Mobilitätsbefragung) nur schwer abschätzen lassen. Wenn beispielsweise einzelne Gebäude oder ganze Industriegebiete einer Stadt ungenutzt sind, wird diese Methode trotzdem Wege zuweisen, da zwar Informationen über die Gebäudefunktionen, aber keine Informationen zur tatsächlichen Nutzung vorliegen.

Die vorgestellte Methode ist übertragbar auf alle Städte, für die eine Mobilitätsbefragung erstellt wurde und welche ein digitales Liegenschaftskataster bereitstellen. Wenn keine stadtspezifische Mobilitätsbefragung vorliegt, könnte näherungsweise die MID-Studie [15] verwendet werden.

Durch die erzeugte Quelle-Ziel-Zeit-Reisezweck-Matrix könnten ÖPNV-Angebote optimiert beziehungsweise in weiterer Zukunft der Einsatz von autonomen Kleinbussen organisiert werden.

4 Ausblick

Durch eine Erweiterung der Methode könnte zukünftig für jede Zelle-zu-Zelle-Relation der Modal-Split für jede Zeiteinheit abgeschätzt werden. Dies könnte z. B. mit den Ergebnissen der Mobilitätsbefragung oder mit der Bestimmung von verkehrsmittelspezifischen Reisewiderständen (vgl. [13]) jeder einzelnen Zelle-zu-Zelle Relation erfolgen. Die vorgestellte Methode hat nur Gebäude-zu-Gebäude-Wege berücksichtigt. Durch Flächennutzungspläne etc. lassen sich auch Informationen zu Naherholungsgebieten, Sportplätzen und anderen unbebauten Flächen gewinnen. Diese könnten in Zukunft als virtuelle Gebäude in die Methode implementiert werden.

Durch die statistischen Informationen des frei zugänglichen Bezirksatlas ist bekannt wieviel Arbeitnehmer in einem statistischen Bezirk wohnen. Die Verteilung der Arbeitnehmer auf einzelne Verkehrszellen könnte mit den Wohnflächen erfolgen. Somit könnte in Zukunft eine bessere Verteilung der Arbeitswege abgeschätzt werden.

Referenzen

- [1] M. Alesić, „Dynamische Umlegung von Quelle-Ziel-Matrizen mit einem makroskopischen Verkehrsflussmodell“. Stuttgart: Springer Vieweg, 2012.
- [2] C. Helmert und H. Henninger, „Mobilitätsbefragung zum werktäglichen Verkehrsverhalten der Bevölkerung in der Stadt Krefeld“. Aachen: Ingenieurbüro Helmert, 2017.
- [3] Statistisches Bundesamt, „Straßenverkehr: EU-weite CO2-Emissionen seit 1990 um 24 % gestiegen“. Destatis, https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO2_Strassenverkehr.html (Aufgerufen 30.November, 2021).
- [4] Stadt Krefeld, „Bezirksatlas 2018“. Krefeld: Stadt Krefeld - Abteilung Statistik und Wahlen, 2019.
- [5] Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, „Liegenschaftskataster Stadt Krefeld“. Stadt Krefeld, <https://open.nrw/dataset/liegenschaftskataster-stadt-krefeld-odp> (Aufgerufen 12.Februar, 2021).
- [6] Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, „Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS®)“. AdV, <https://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Liegenschaftskataster/ALKIS/> (Aufgerufen 30.November, 2021).
- [7] S. Mohanty, A. Pozdnukhov, „Dynamic Origin-Destination Demand Estimation From Link Counts, Cellular Data And Travel Time Data“. Mumbai: World Conference on Transport Research, 2019.
- [8] J. Dallmeyer, „Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt“. Frankfurt am Main: Springer Vieweg 2013.
- [9] W. Schnabel, D. Lohse, „Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung“. Berlin: Beuth 2011.
- [10] M. Madsen, L. Spengler, M. Gennat, „Entwicklung einer Kennzahl zur Identifikation von Verbesserungspotential in der Verkehrsinfrastruktur“ in „Transforming Mobility – What Next?“. Duisburg: Springer 2021.
- [11] M. Gennat, M. Madsen, L. Spengler, „Computation of Travel Purpose Distribution Using Open Data Sources“. Bern: Operations Research 2021.

- [12] M. Madsen, L. Spengler, M. Gennat, „Entwicklung einer Quelle-Ziel-Zeit-Matrix auf Basis freier Datenquellen als Planungsgrundlage für eine energieeffizientere Mobilität“. Graz: 17. Symposium Energieinnovation 2022. -Im Veröffentlichungsprozess-
- [13] G. Steierwald, H.-D. Künne, „Stadtverkehrsplanung“. Stuttgart: Springer, 2005.
- [14] Open Street Map-Mitwirkende. Deutschland. Open Data Commons Open Database Lizenz ODbL (www.openstreetmap.org/copyright), 2021.
- [15] Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft, „Mobilität in Deutschland 2017 - Ergebnisbericht“. Bonn: BMDV 2018.
- [16] Google, „General Transit Feed Specification (GTFS) - Overview“. Google: <https://developers.google.com/transit/gtfs> (Aufgerufen 21. Januar, 2022).
- [17] Intraplan Consult GmbH, „Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen im Schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr“. München: ITP 2016.
- [18] Bezirksregierung Köln, „Digitales Geländemodell NW Gitterweite 1m“. Geobasis NRW: <https://open.nrw/dataset/0c6796e5-9eca-4ae6-8b32-1fcc5ae5c481> (Aufgerufen 18. Januar, 2022).
- [19] D. Huber, T. Viere, E. H. Nemoto, I. Jaroudi, D. Korbee, G. Fournier, „Climate and environmental impacts of automated minibuses in future public transportation“. Brüssel: „Transportation Research Part D Transport and Environment“ 2022.
- [20] D. Briskorn, „Operations Research“. Wuppertal: Springer Gabler, 2019.
- [21] J.V. BECK, K.J. ARNOLD, „Parameter Estimation in Engineering and Science“ in „AIChE Journal (Vol. 24, No. 2)“ 1978.