

MODELLIERUNG DER VERKEHRSNACHFRAGE ZUR ENTWICKLUNG VON ENERGIEEFFIZIENTEN MOBILITÄTSANGEBOTEN

Marius Madsen, Lukas Spengler, Marc Gennat

SWK E² Institut an der Hochschule Niederrhein, Reinarzstr. 49, 47805 Krefeld, Tel. +49 2151 822-6697, marius.madsen@hs-niederrhein.de, www.e2.hsnr.de

Kurzfassung: Der Untersuchungsraum wird durch Verschneidung frei verfügbarer Datenquellen modelliert. Auf Basis empirischer Daten wird die Verkehrserzeugung und -verteilung abgeschätzt. Ziel ist die Erstellung eines hochauflösenden dynamischen Verkehrsnachfragemodells.

Keywords: Verkehrsmodellierung, Verkehrszellen, Parameterschätzung, Open Data

1 Einführung

Die effiziente Modellierung der Verkehrsnachfrage ist ein wichtiger Schritt bei der Entwicklung nachhaltiger Mobilitätslösungen. Zur Erstellung eines dynamischen Verkehrsnachfragemodells sind in der Regel aufwändige Verkehrsstärkemessungen oder das Tracking von Personen erforderlich, was mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Diese Arbeit stellt eine alternative Methode zur Abschätzung der Verkehrsnachfrage vor, die ohne den oben genannten Aufwand auskommt. Durch die Modellierung von Verkehrszellen in Verbindung mit frei verfügbaren Datenquellen wird der zu untersuchende Raum abgebildet. Auf Basis empirischer Daten wird die Verkehrserzeugung und -verteilung abgeschätzt, um ein hochauflösendes Verkehrsnachfragemodell zu entwickeln. Diese Erkenntnisse sind von entscheidender Bedeutung, um alternative Mobilitätsangebote nachfragegerecht zu entwickeln und die Mobilität in unterschiedlichen Raumtypen zu optimieren.

2 Abschätzung der Quell- und Zielverkehrserzeugung

Bei der Untersuchung von Verkehrsnetzen in Städten ist es üblich, den Raum in diskrete Verkehrszellen aufzuteilen, um die Komplexität zu reduzieren. Diese Zellen, die als Verkehrsknotenpunkte dienen, vereinfachen die Darstellung und Analyse des Verkehrsnetzes, indem sie die Anzahl der zu analysierenden Verkehrsbeziehungen deutlich verringern. Dadurch wird die Analyse und Simulation von Verkehrsströmen effizienter. [1]

2.1 Geometrie der Verkehrszellen

In der Verkehrsmodellierung werden zwei Haupttypen von Verkehrszellen unterschieden: nicht-uniforme und uniforme Zellen. Nicht-uniforme Zellen bieten genauere Ergebnisse, sind aber komplexer in der Implementierung. Uniforme Zellen, wie Quadrate und Hexagone, sind einfacher zu erstellen und zu analysieren, was zu einer Reduzierung der Modellkomplexität und Berechnungszeit führt [1]. Diese Studie fokussiert sich auf uniforme Zellen. Als Geometrie

wird eine hexagonale Form gewählt, da diese eine gleichmäßige Form und Größe bieten und kürzere mittlere und maximale Anmarschdistanzen aufweisen als z.B. Quadrate, was den Modellfehler reduziert. Als Verkehrszellengröße wurde in Anlehnung an [2] 160.000 m² gewählt.

2.2 Aufteilung in Verkehrszellen durch Dirichlet-Zerlegung

Die Einteilung der Verkehrszellen wird anhand statistisch-administrativer Strukturen wie Stadtteilen vorgenommen, um den Aufwand für die Aufbereitung, Aggregation und das Zusammenführen von Ein- und Ausgangsdaten zu reduzieren. Für die Aufteilung in Verkehrszellen werden die Stadtteilgrenzen aus OpenStreetMap [3] herangezogen und in hexagonale Verkehrszellen eingeteilt. Dafür wird ein geeignetes Punkteraster in dem Stadtteil verteilt und durch Dirichlet-Zerlegung ergeben sich die Grenzen der Verkehrszellen. In den Stadtteilgrenzen werden diese dann mit dem Stadtteil-Polygon zugeschnitten. Dafür ist es erforderlich, dass die resultierenden Voronoi-Zellen nicht unendlich groß werden. Um dies sicherzustellen werden zusätzliche Begrenzungspunkte um den jeweiligen Stadtteil verteilt.

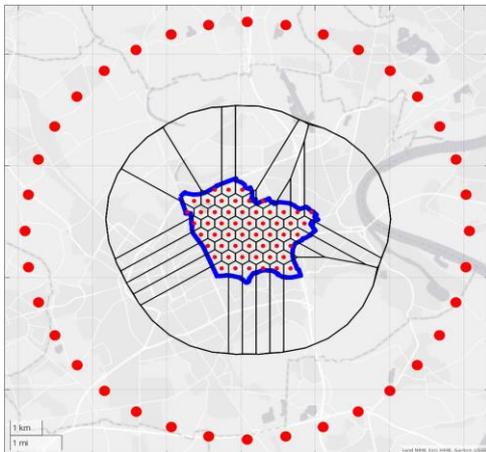


Abbildung 1: Resultierende Voronoi-Zellen

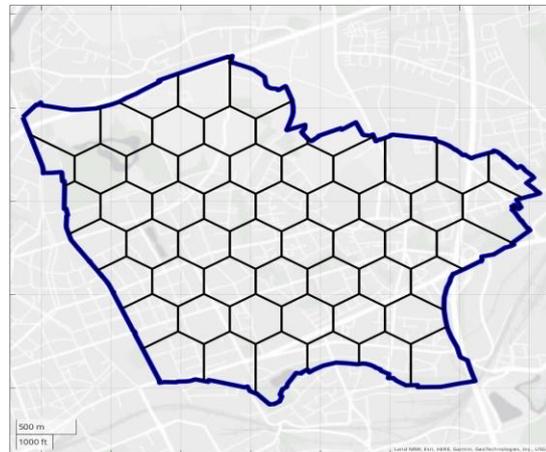


Abbildung 2: Zugeschnittene Voronoi-Zellen

2.3 Anpassung mithilfe des Lloyd-Algorithmus

Um eine gleichmäßigere Größe und Form der Verkehrszellen zu gewährleisten, wird der Lloyd-Algorithmus, ein k-Means-Algorithmus bekannt aus der Vektorquantisierung und Clusteranalyse, angepasst. Dieser Algorithmus teilt Daten in k homogene Gruppen auf, beginnend mit einer zufälligen Zuweisung von Datenpunkten zu Clusterzentren und fortschreitend durch die Zuordnung von Datenpunkten zu den nächstgelegenen Zentren, die dann aktualisiert werden. Der Prozess wiederholt sich bis zum Erreichen einer vordefinierten Abbruchbedingung, wie minimaler Veränderung der Clusterzentren oder einer bestimmten Anzahl von Iterationen, was eine optimierte Gruppierung der Daten ermöglicht [4].

Im Kontext der Verkehrszellenaufteilung wird der Lloyd-Algorithmus jedoch modifiziert verwendet. Anstatt k Cluster aus Objekten zu formen, dient er hier dazu, einen Stadtteil optimal in k Verkehrszellen zu gliedern. Hierbei wird das Clusterzentrum als Flächenschwerpunkt der Voronoi-Zelle aus der vorherigen Iteration definiert, anstatt als Mittelwert von Datenpunkten. Diese Anpassung macht den Algorithmus für flächenkontinuierliche Probleme wie die Aufteilung eines Gebiets in Verkehrszellen anwendbar. Als Abbruchkriterium wird die nicht

mehr geringer werdende Standardabweichung der Verkehrszellengrößen herangezogen. In Abbildung 3 sind die Zwischenergebnisse dieses Verfahrens beispielhaft am Stadtteil Bockum aufgetragen. Dieses Verfahren kann somit auf ganz Deutschland automatisiert für alle Stadtteile und Gemeinden angewendet werden.

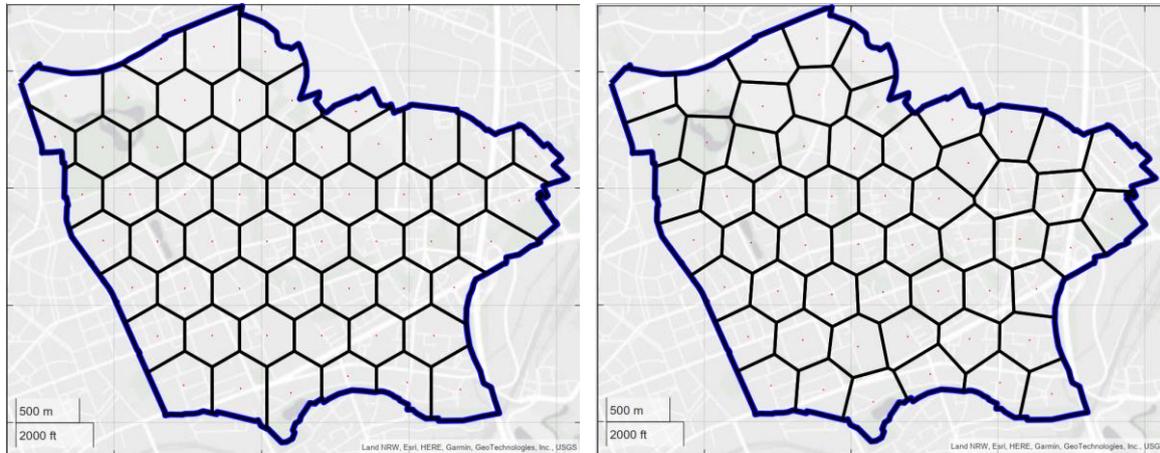


Abbildung 3: Verkehrszellen nach 0 und 48 Iterationen des angepassten Lloyd-Algorithmus

2.4 Charakterisierung der Verkehrszellen

2.4.1 Gebäude

Zur Modellierung der Gebäude einer Verkehrszelle werden die Grundriss-Polygone der einzelnen Gebäude aus der frei verfügbaren OpenStreetMap [3] extrahiert.

2.4.2 Vereinfachung von Nutzungsarten

Neben der Grundfläche sind in der OpenStreetMap oftmals die Nutzungsart des Gebäudes (z.B. „supermarket“) hinterlegt. Wenn dies nicht der Fall ist, wird die Gebäudenutzung über die in OpenStreetMap bekannte Gebietsflächenart mit dem tag „landuse“ zugeordnet, z.B. zu „residential“. Um Gebäude als Ziele von Wegen in Anlehnung an [5] zuordnen zu können, werden die in der OSM hinterlegten Gebäudefunktionen anteilig die vereinfachten Nutzungsarten Arbeiten, Ausbildung, Einkaufen, Besorgungen, Freizeit und Wohnen aufgeteilt.

2.5 Etagenanzahl

Da die Nutzfläche eines Gebäudes relevant ist um die Wegeerzeugung abzuschätzen [6] muss die Grundfläche mit der noch unbekanntem Etagenanzahl multipliziert werden. Diese wird näherungsweise über die Gebäudehöhe bestimmt. Dazu wurden durchschnittliche Etagenhöhen je Gebäudenutzungsart ermittelt anhand bekannter Gebäudehöhen aus [7], welche mit den teilweise bekannten Etagenanzahl aus OpenStreetMap [3] verschnitten wurden, abgeschätzt. Für Gebäude des Typs „garage“ resultiert z.B. eine durchschnittliche Etagenhöhe von 2,5 m, wobei für Gebäude des Typs „industrial“ eine Etagenhöhe von 5,5 m angenommen wird.

Die Gebäudehöhe wird primär aus [7] entnommen. In vielen Bundesländern ist diese Quelle nicht frei verfügbar, in diesen Fällen wird auf [8] zurückgegriffen. [8] basiert auf einer

Abschätzung der Gebäudehöhe anhand des Gebäudeschattenwurfs auf Basis von Satellitenbildern.

2.5.1 Bevölkerung

In Deutschland ist die Bevölkerungsdichte in einem 100 Meter x 100 Meter-Raster durch [9] verfügbar. Für die Verteilung der Bevölkerung auf die Verkehrszellen wird die Bevölkerung zunächst auf die Wohngebäude die innerhalb einer Zensus-Zelle sind, gewichtet mit der Wohnfläche, aggregiert und anschließend auf die Verkehrszellen disaggregiert. Das Resultat ist in Abbildung 4 beispielhaft dargestellt.

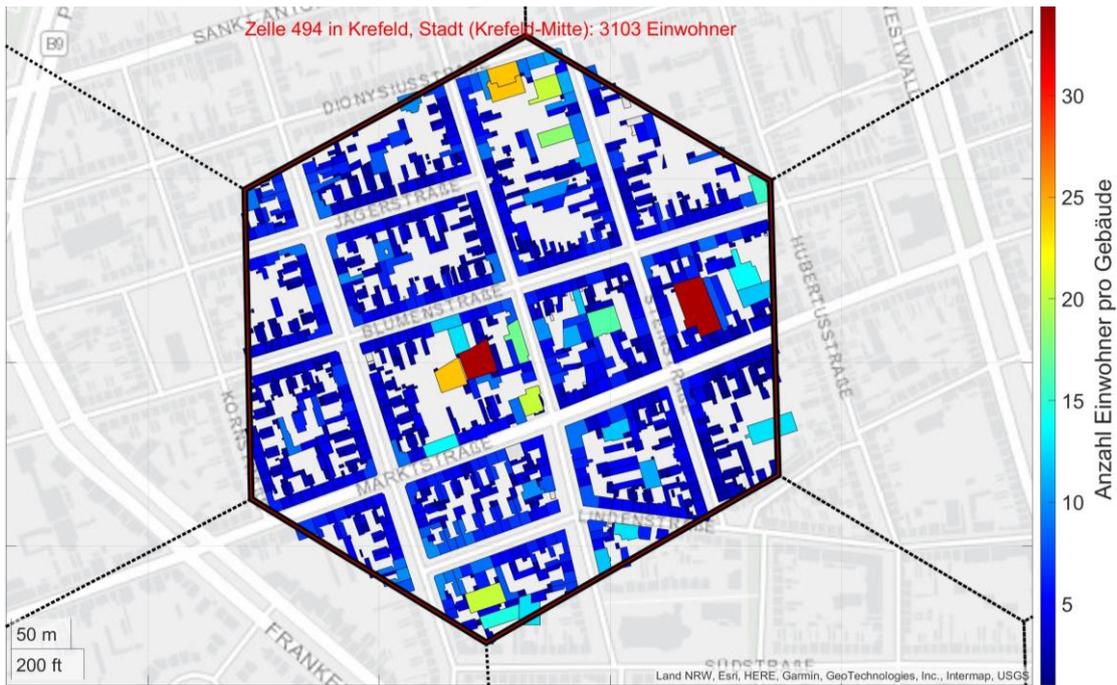


Abbildung 4: Bevölkerungsreichste Verkehrszelle in Krefeld

2.6 Gewichtung der Verkehrszellen je Wegezweck und Verkehrserzeugung

Je nach Wegezweck bzw. Nutzungsart werden die Verkehrszellen gewichtet. Für den Wegezweck „Wohnen“ wird die ermittelte Bevölkerungsstärke herangezogen und die Verkehrszellen damit gewichtet. Für die anderen Wegezwecke werden die jeweiligen anteiligen Nutzflächen herangezogen und untereinander gewichtet auf Basis [6]. Dies ist erforderlich, da beispielsweise bei einer Supermarktfläche pro Quadratmeter mit einer höheren Verkehrserzeugung zu rechnen ist als bei einer Gartenbaumarktfläche mit derselben vereinfachten Nutzungsart [6]. Durch die empirische Untersuchung [5] sind die durchschnittlichen Wege je Wegezweck für die Anzahl der Bevölkerung und den regionalstatistischen Raumtyp [5] bekannt. Die Verkehrserzeugung der einzelnen Verkehrszellen erfolgt über die ermittelte Verkehrszellengewichtung je Wegezweck.

3 Verkehrsverteilung

Durch die Aufteilung in Wegezwecke in [5] ist das Ziel eines Weges bekannt, beispielsweise hat ein Arbeitsweg eine Arbeitsstätte als Ziel und ein Heimweg ein Wohngebäude. Es ist jedoch bisher unbekannt, wo diese Wege beginnen.

3.1 Abschätzung von Quelle-Ziel-Gruppen

Durch die empirische Auswertung [11] sind die 15 häufigsten Aktivitätsmuster der befragten Personen am Stichtag aufgeführt, wobei der Anteil der einzelnen Aktivitätsketten mit aufgeführt ist. Eine solche Aktivitätskette beginnt und endet immer mit der Aktivität „wohnen“ und kann z.B. folgendes Muster aufweisen: „Wohnen-Arbeiten-Einkaufen-Wohnen“ (Anteil 1,9 Prozent aller Ausgänge). Diese 15 häufigsten Muster decken 79,6 Prozent aller erfassten Aktivitätsmuster ab. Diese Aktivitätsketten wurden mittels einer systematischen Analyse der Aktivitätsmuster in eine Matrix überführt. Dabei wurden die sequenziellen Übergänge zwischen den verschiedenen Aktivitäten quantitativ ausgewertet, um die Wahrscheinlichkeiten der Quelle-Ziel-Übergänge zu bestimmen. Die resultierenden Quelle-Ziel-Gruppen sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Werte beschreiben die Anteile der Quelle an den Wegen mit dem jeweiligen Ziel.

Tabelle 1: Auswertung der SrV 2013

	Ziel						
		Arbeit	Ausbildung	Einkauf	Erledigung	Freizeit	Wohnen
Quelle	Arbeit	0 %	0 %	5 %	5 %	6 %	17 %
	Ausbildung	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	13 %
	Einkauf	0 %	0 %	5 %	3 %	2 %	16 %
	Erledigung	0 %	0 %	3 %	3 %	1 %	10 %
	Freizeit	4 %	0 %	6 %	6 %	3 %	23 %
	Wohnen	76 %	80 %	60 %	62 %	68 %	0 %
	Σ	79,6 %	79,6 %	79,6 %	79,6 %	79,6 %	79,6 %

Diese ersten Quelle-Ziel-Gruppen reichen nicht um die Verkehrsverteilung vorzunehmen. Zum einen sind nur 79,6 Prozent der Aktivitätsmuster abgedeckt und zum anderen sind die Aktivitätsketten aus [11] eine überregionale Auswertung. [5] führt Unterschiede je nach „RegionalTyp“ auf, außerdem gibt es in manchen Gemeinden z.B. anteilig weniger Arbeitsplätze oder Einkaufsmöglichkeiten was zu einer Verzerrung führen könnte. Durch [5] und die Gewichtung der Verkehrszellen ergibt sich die erwartete tatsächliche Spaltensumme der Quelle-Ziel-Gruppen.

$$\sum_{k1=1}^K a_{k1,k2} \cdot x_{k1,k2} = w_{k2} \quad \forall k2 \in \{1, \dots, K\} \quad (1)$$

Dabei ist K die Anzahl der verschiedenen Aktivitäten, bzw. Reisezwecke. $k1$ ist die Aktivität, die beendet wird um die Aktivität $k2$ aufzunehmen. Es wird angenommen, dass die werktägliche Summe der Quell-Wege der Summe der Ziel-Wege entspricht und die werktägliche Aktivitätsverteilung um 0 Uhr der um 24 Uhr entspricht. Damit sind auch die Zeilensummen der tatsächlichen Wege bekannt, die den Spaltensummen entsprechen.

$$\sum_{k2=1}^K a_{k1,k2} \cdot x_{k1,k2} = \sum_{k1=1}^K a_{k1,k2} \cdot x_{k1,k2} \quad \forall k1 \in \{1, \dots, K\} \cap k2 \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2)$$

Eine weitere Nebenbedingung lautet, dass der Anteil einer Wegegruppe immer $0 \% \leq x \leq 100 \%$ beträgt.

$$x_{k1,k2} \geq 0 \quad \forall k1 \in \{1,2, \dots, K\} \cap k2 \in \{1,2, \dots, K\} \quad (3)$$

Da angenommen wird, dass die Tabelle 1 eine gute Einschätzung der Realität ist, wird die Kostenfunktion als die quadratische Abweichung zu der ersten Schätzung formuliert. Somit ergibt sich für ein Parameterschätzverfahren die Methode der kleinsten Quadrate [10] mit der Kostenfunktion

$$c(\mathbf{X}) = \sum_{k1=1}^K \sum_{k2=1}^K (a_{k1,k2} \cdot x_{k1,k2} - b_{k1,k2})^2 \quad (4)$$

Nach Anwendung des Schätzverfahrens ergibt sich beispielhaft für Krefeld die in Tabelle 2 dargestellten Quelle-Ziel-Gruppen. Mit [5] und der ermittelten Verkehrserzeugung sind die Wege w_{k1k2} bestimmbar.

Tabelle 2: Resultierende Quelle-Ziel-Gruppen für Krefeld

		Ziel					
		Arbeit	Ausbildung	Einkauf	Erledigung	Freizeit	Wohnen
Quelle	Arbeit	4 %	4 %	11 %	11 %	15 %	10 %
	Ausbildung	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %	7 %
	Einkauf	3 %	3 %	9 %	7 %	5 %	22 %
	Erledigung	3 %	3 %	7 %	7 %	5 %	19 %
	Freizeit	8 %	3 %	10 %	10 %	6 %	38 %
	Wohnen	78 %	83 %	60 %	62 %	65 %	3 %
	Σ	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

3.2 Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen

Die abgeschätzten Quelle-Ziel-Gruppen entsprechen den Aktivitätsmustern eines Tages, da Mobilitätsverhalten stark zeitabhängig ist [5], [11], muss angenommen werden, dass diese Matrix so nicht auf jede Stunde des Tages übertragbar ist. [13] hat die Rohdaten von [5] untersucht und anteilige Tagesganglinien TG für Quell- und Zielverkehr der einzelnen Aktivitäten ermittelt. Somit ist jeweils die Summe der Quell- und Zielverkehre w_{k1} und w_{k2} jeder Stunde eines Werktages bekannt.

$$\sum_{k2=1}^K \hat{x}_{k1,k2,t} \cdot w_{k1k2} = TG_{t,k1} \cdot \sum_{k2}^K w_{k1k2} \quad \forall k1 \in \{1, \dots, K\} \cap t \in \{1, \dots, 24\} \quad (5)$$

$$\sum_{k1=1}^K \hat{x}_{k1,k2,t} \cdot w_{k1k2} = TG_{t,k1} \cdot \sum_{k1}^K w_{k1k2} \quad \forall k2 \in \{1, \dots, K\} \cap t \in \{1, \dots, 24\} \quad (6)$$

In der Summe über den Tag müssen die zu ermittelnden Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen den in 3.1 abgeschätzten Quelle-Ziel-Gruppen entsprechen.

$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{k2=2}^K \hat{a}_{k1,k2,t} \cdot \hat{x}_{k1,k2,t} = \sum_{k2}^K w_{k1k2} \quad \forall k1 \in \{1, \dots, K\} \cap t \in \{1, \dots, 24\} \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{k1=2}^K \hat{a}_{k1,k2,t} \cdot \hat{x}_{k1,k2,t} = \sum_{k1}^K w_{k1k2} \quad \forall k2 \in \{1, \dots, K\} \cap t \in \{1, \dots, 24\} \quad (8)$$

Außerdem muss der Anteil der Wege zu jeder Stunde positiv sein.

$$\hat{x}_{k_1, k_2, t} \geq 0 \quad \forall k_1 \in \{1, 2, \dots, K\} \cap k_2 \in \{1, 2, \dots, K\} \cap t \in \{1, 2, \dots, 24\} \quad (9)$$

Es resultieren 576 Ungleichheitsbedingungen und 36 Gleichheitsbedingungen. Da $K^2 \cdot 24 = 846$ Parameter zu schätzen sind, ist das Problem bisher unterbestimmt. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden verschiedene zufällige Kostenfunktionen mit einem Parameterschätzverfahren unter den genannten Nebenbedingungen angewendet, dadurch konnte festgestellt werden, dass die möglichen \hat{x} innerhalb der Nebenbedingungen stark variieren können.

Näherungsweise wird im Folgenden analog zu (4) die quadratische Abweichung des mit einem Savitzki-Golay-Filter gefilterten Ergebnisses von \hat{x} als Kostenfunktion verwendet. Der Savitzki-Golay-Filter glättet Daten durch Anpassung eines Polynoms niedriger Ordnung an Untergruppen von Datenpunkten mittels der Methode der kleinsten Quadrate. Dadurch werden unerwartete Sprünge in der Lösung reduziert, ohne dass grundlegende Merkmale und Trends unterdrückt werden [12]. Zum aktuellen Zeitpunkt ist noch unzureichend erklärt, ob die Anwendung dieser Kostenfunktion eine gute Annäherung an die Realität darstellt, oder ob diese nur eine ästhetischere Ergebniskurve erzeugt. Für Wege die bei „Wohnen“ beginnen ergibt sich beispielhaft die in Abbildung 5 dargestellte zeitliche Verteilung der Wegeziele Zwischen Krefeld und dem gesamten Regierungsbezirk Düsseldorf.

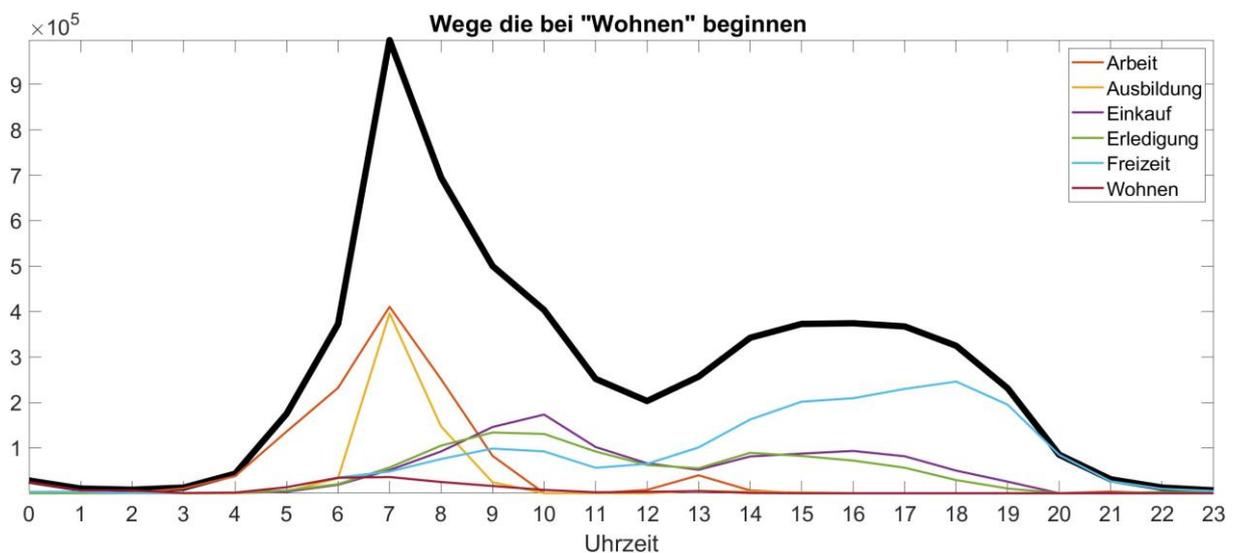


Abbildung 5: Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen am Beispiel beginnender Wege bei "Wohnen"

3.3 Analyse Mobilität in Deutschland 2017

In [5] ist für jeden Raumtyp und Reisezweck der Anteil der Wegedauer in Gruppen bekannt. Es wird angenommen, dass Ziele, die mit kurzen Wegen erreicht werden können, bevorzugt werden. Dies geht aber aus der Wegedauer in Gruppen aus [5] nicht eindeutig hervor. Bei einer Betrachtung der in einer bestimmten Wegedauer erschließbaren Ziele ergibt sich eine Reisezeitdichte. Diese kann ab dem zweiten Zeitschritt mit einer exponentiellen Abnahme modelliert werden. Dies ergibt sich bei der Betrachtung aller Raumtypen und Reisezwecke und ist beispielhaft in Abbildung 6 dargestellt.

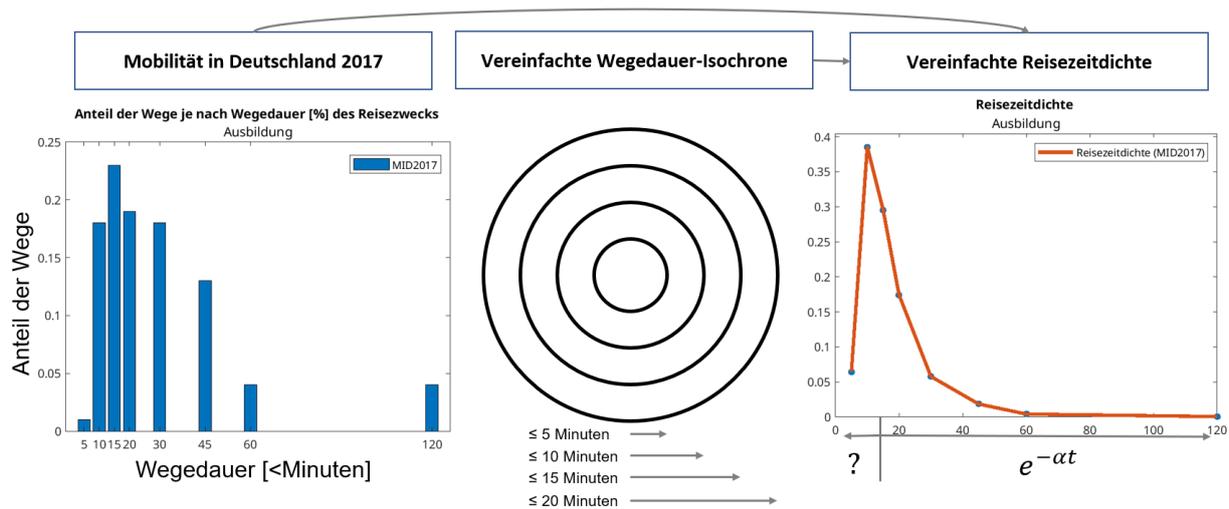


Abbildung 6: Betrachtung der Reisezeitdichte

3.4 Bewertungsfunktion

Um die in 3.2 ermittelten Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen auf die einzelnen Verkehrszellen-Relationen zu disaggregieren, wird im Folgenden eine Bewertungsfunktion gebildet. Grundlage hierfür sind die für die wichtigsten Reisemittel (MIV, ÖPNV, Fahrrad, Fuß) die Reisewiderstände, welche sich für die einzelnen Relationen ergeben. Der Reisewiderstand einer Relation und eines Verkehrsmittels quantifiziert die Unannehmlichkeit, die sich in der betrachteten Stunde durch den Weg dieser Relation und des jeweiligen Verkehrsmittels ergibt. Das Verfahren zur Ermittlung der Reisewiderstände ist in [14] ausführlich beschrieben. Es wird angenommen, dass die Zielwahl durch den Reisewiderstand besser vorhergesagt werden kann als durch die einfache Reisezeit.

In Analogie zur elektrotechnischen Netzwerkanalyse werden die in Kapitel 2 ermittelten Quell- und Zielverkehre der einzelnen Verkehrszellen und derer gewichteten Nutzflächen einzelner Aktivitäten k und der jeweiligen Stunde t des Tages als Kapazitäten C_{ikt} und C_{jkt} betrachtet. Diese Kapazitäten tauschen in Abhängigkeit der (Reise-) Widerstände Ladungsströme, bzw. Wege aus. In dieser Analogie sind alle Quellen mit jedem Ziel über jeweils vier Leitungen, welche die Reisemittel darstellen, verbunden. Wesentlich für die Anzahl der Wege einer bestimmten Relation ist neben den Kapazitäten demnach der Widerstand R_{ijt} der ein Gesamtwiderstand vier paralleler Widerstände ist. Die Bewertungsfunktion ergibt sich mit

$$Q_{ijkt} = \frac{C_{ikt} \cdot C_{jkt} \cdot e^{-\alpha_k \cdot R_{ijt}}}{\sum_{j=1}^J (C_{jkt} \cdot e^{-\alpha_k \cdot R_{ijt}})} \quad (10)$$

Wobei die Normierung durch den Term im Nenner sichergestellt ist. Somit werden nur die Wege verteilt, die aus den Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen vorgegeben sind. Der Koeffizient α_k wird für alle Aktivitäten k iterativ durch Vergleich der resultierenden Reisezeitverteilungen mit den Reisezeiten aus [5] ermittelt.

3.5 Ergebnis

Da die finalen Reisewiderstände aus [14] noch nicht vorliegen, wird die Methode mit vorläufigen Reisewiderständen angewandt. Das Ergebnis ist eine Quelle-Ziel-Zeit-Matrix aller

Verkehrszellen. Wenn die resultierenden Reisezeiten analog zur Vorgehensweise in Abbildung 6 als Reisezeitdichte dargestellt werden, ergibt sich ein ähnliches Profil. Dies ist ebenfalls für Wege des Zwecks Ausbildung beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt. Die Ergebnisse für die anderen Reisezwecke haben ebenfalls ein sehr ähnliches Profil.

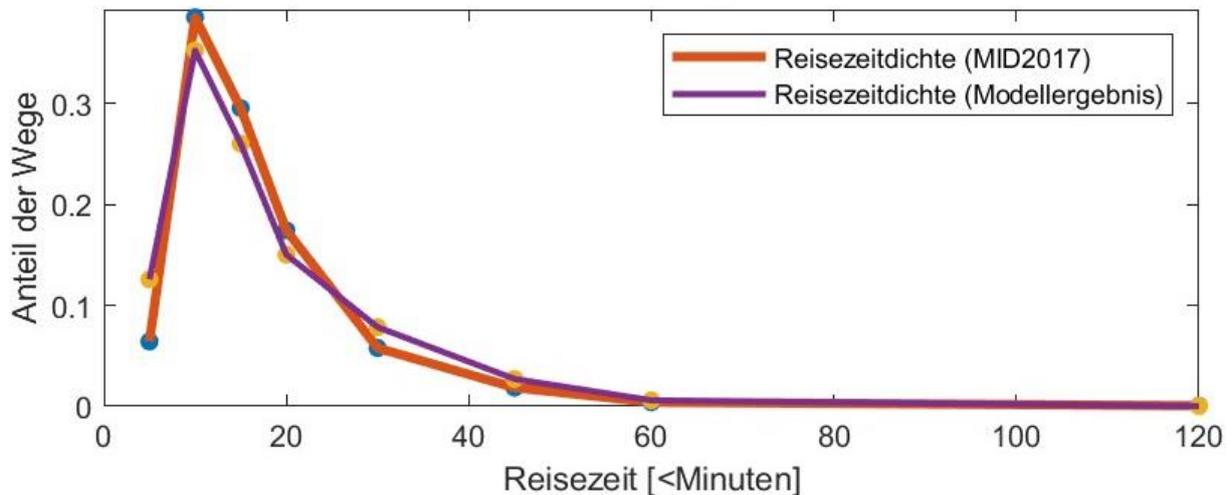


Abbildung 7: Resultierende Reisezeitdichte für den Wegezweck "Ausbildung" in Krefeld

4 Diskussion und Ausblick

Die vorgestellte Methode bildet den Quell- und Zielverkehr beliebiger Gebiete und Relationen in Deutschland ausschließlich auf Basis offener Datenquellen hochaufgelöst ab. Es wurde gezeigt, dass eine einfache Bewertungsfunktion das empirische Reisezeitprofil zumindest näherungsweise abbilden kann. Auffällig ist, dass das Modell auch im ersten Zeitschritt (\leq fünf Minuten) einen ähnlichen Sprung erzeugt. Dies kann möglicherweise damit erklärt werden, dass bei homogenen Gebietsstrukturen (z.B. Industriegebiet, Wohngebiet, etc.) Wege von einer Aktivität zu einer anderen seltener im ersten Zeitschritt (\leq fünf Minuten) möglich sind.

Es muss angenommen werden, dass die Abschätzung der Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen aufgrund des unterbestimmten Gleichungssystems noch ungenau ist. Möglicherweise können auf Basis bisher nicht analysierter empirischer Untersuchungen weitere Nebenbedingungen bzw. Messwerte definiert werden.

Die Validierung der resultierende Quelle-Ziel-Zeit-Matrix steht noch aus. Es ist geplant, diese auf Basis von Mobilfunkdaten und weiteren empirischen Untersuchungen zu validieren, sobald die finalen Reisewiderstände vorliegen.

5 Referenzen

- [1] Storani, F., Di Pace, R., Bruno, F. *et al.* Analysis and comparison of traffic flow models: a new hybrid traffic flow model vs benchmark models. *Eur. Transp. Res. Rev.* 13, 58 (2021).
- [2] Madsen, M., Spengler, L. & Gennat, M.: Entwicklung einer Quelle-Ziel-Zeit-Matrix auf Basis freier Datenquellen als Planungsgrundlage für eine energieeffiziente Mobilität. Vorgestellt auf dem 17. Symposium Energieinnovation, Graz, 2022.
- [3] OpenStreetMap und Mitwirkende. Planet dump [Datendatei vom 01.11.2023]. Abgerufen von <https://planet.openstreetmap.org>.

- [4] MacKay, D.J.C. Information Theory, Inference and Learning Algorithms. Cambridge University Press, 2003
- [5] Follmer, Robert und Gruschwitz, Dana (2019): Mobilität in Deutschland – Kurzbericht. Ausgabe 4.0 der Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (FE-Nr. 70.904/15). Bonn, Berlin. www.mobilitaet-in-deutschland.de.
- [6] Bossert, D., & Vogt, W. (2007). Schätzung des Verkehrsaufkommens aus Kennwerten der Flächennutzung und des Verkehrs. In: Straßenverkehrstechnik, 51(2007), Teil 1: S. 12-20; Teil 2: S. 69-73. FGSV-Nr.: 147 FGSV Reader. ISBN: 3-939715-06-9.
- [7] Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW). (2023). 3D-Gebäudemodell LoD1. Abgerufen von https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/3dg/lod1_gml/
- [8] Humboldt-Universität zu Berlin: *Earth Observation Lab, Gebäudehöhenmodell* <https://ows.geo.hu-berlin.de/webviewer/building-height/index.html>, Abgerufen am 04.12.2023.
- [9] Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2011). Zensus 2011: 100m x 100m Rasterdaten zu Gebäuden, Wohnungen, Haushalten, Familien und Personen. Abgerufen von www.zensus2011.de.
- [10] J.V. BECK, K.J. ARNOLD, „Parameter Estimation in Engineering and Science“ in „AIChE Journal (Vol. 24, No. 2)“, 1978.
- [11] Technische Universität Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr. (2013). SrV 2013: Mobilität in Städten. Abgerufen von <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/srv-2013>.
- [12] Kordestani, H., & Zhang, C. Direct Use of the Savitzky–Golay Filter to Develop an Output-Only Trend Line-Based Damage Detection Method. In: Sensors, 20(7), 1983. doi: 10.3390/s20071983.
- [13] Klein, T. Neue Tagesganglinien des Quell- und Zielverkehrs – Auswertung der MiD-Daten zum nutzungsspezifischen Tagesgang der Verkehrsnachfrage. Straßenverkehrstechnik, 65(3), 183-9. ISSN: 0039-2219, 2021.
- [14] L. Spengler *et al.*, "From Modeling to Optimizing Sustainable Public Transport: A New Methodological Approach," *Sustainability*, vol. 15, no. 10, p. 8171, 2023.