

Mittlere Binnendistanz räumlicher Aggregate

Gegenüberstellung unterschiedlicher Ansätze zur Schätzung der mittleren Binnendistanz von räumlichen Aggregaten am Beispiel deutscher Verwaltungsgebiete

Average Internal Distance of Spatial Aggregates

Comparison of Approaches to Estimate the Average Internal Distance of Spatial Aggregates Using German Administrative Areas as an Example

Timotheus Klein

ARGUS Stadt und Verkehr · t.klein@argus-hh.de

Zusammenfassung: Zahlreiche Verkehrsanalysen und -modelle arbeiten mit Verkehrszellen, räumlichen Aggregaten, deren Beziehungen untereinander von vorrangigem Interesse sind, deren interne Vorgänge jedoch oft nicht vollständig ausgeblendet werden können. Grundlage der analytischen Behandlung dieser internen Vorgänge sind in der Regel dieselben relationalen Kenngrößen, mit denen die Beziehungen zwischen unterschiedlichen Verkehrszellen beschrieben werden. Die Quantifizierung dieser Binnenkenngrößen erfolgt oft ad hoc, wobei sich in der einschlägigen Literatur eine Reihe verschiedener Ansätze finden lassen. Hier werden diese Ansätze auf die Kreis- und Gemeindegebiete Deutschlands angewendet und den Ergebnissen einer etwas aufwendigeren experimentellen Berechnung der Binnendistanzen u. a. auf Grundlage des Netzmodells der Bundesverkehrswegeplanung gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die Näherung mit dem Radius eines flächengleichen Kreises wesentlich bessere Ergebnisse liefert als die in der Verkehrsmodellierung verbreitete Auswertung der Distanzmaße zu benachbarten Verkehrsbezirken.

Schlüsselwörter: Binnendistanz, relationale Kenngrößen, Verkehrsmodell, Verkehrszelle

Abstract: *Many transport analyses and models work with traffic analysis zones, spatial aggregates whose relations with each other are of predominant interest, but whose internal proceedings cannot be wholly ignored. The basis for the analytical treatment of the internal proceedings are usually the same attributes that are used to describe the relations between different traffic analysis zones. Their quantification is often designed ad hoc, leading to a variety of different approaches to be found in literature. This study applies a selection of such approaches to Germany's town and county boundaries and compares them to the results of a somewhat more detailed examination of internal distances using, among other resources, the network model used for federal strategic transport planning. The results demonstrate that the approximation using the radius of circle of equal area provides better results than the widespread evaluation of modelled distances to neighbouring zones.*

Keywords: *Internal distance, relational attributes, transport model, traffic analysis zone*

1 Motivation und Stand der Technik

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Kennwerte von Relationen zwischen verschiedenen Flächen können durch die Messung der Kennwerte zwischen Paaren repräsentativer Punkte quantifiziert werden. Bei den repräsen-

tativen Punkten kann es sich z. B. um den geometrischen Schwerpunkt der Fläche oder andere anwendungsbezogen definierte Punkte handeln. Da in den meisten Fällen ein relationaler Kennwert (und nicht mehrere) von Interesse ist, und der mögliche Fehler durch die Repräsentation der Fläche in nur einem Punkt bei größeren Distanzwerten irrelevant wird, können die Kennwerte von Relationen zwischen Flächen in vielen Fällen einfach, schnell und in zufriedenstellender Qualität durch die Messung zwischen zwei Punkten quantifiziert werden. Mit einer wesentlichen Ausnahme: wenn die Relation innerhalb ein- und derselben Fläche zu quantifizieren ist und die Messung zwischen zwei Punkten – mit Ergebnis 0 – für die weitere Verwendung der Berechnungsergebnisse inakzeptabel ist.

Diese Situation ist gegeben, wenn Untersuchungsräume in räumlichen Aggregaten vorliegen und die Relationen der Aggregate sowohl untereinander als auch innerhalb der Aggregate zu betrachten sind, wie z. B. bei der Untersuchung von Excess Commuting (Kanaroglou et al., 2015) oder in makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen (Brannolte, 2000). Die Binnenrelationen solcher räumlichen Aggregate werden z. B. in Verkehrsmodellen in der Regel nicht abgebildet (Cerwenka, 2002), sodass deren Quantifizierung erhebliche Konsequenzen für die Güte des Modells haben kann. Da in den betroffenen Studien häufig mit rechenintensiven Modellen gearbeitet wird, besteht die Notwendigkeit, die Binnenkenngrößen mit einem Aufwand zu quantifizieren, der ihrer beschränkten Relevanz – belegt durch die räumliche Differenzierung – angemessen ist. Dabei kommen verschiedene Berechnungsansätze zur Anwendung, die häufig ad hoc konzipiert und keiner kritischen Überprüfung unterzogen werden. Ziel dieser Untersuchung ist die Gegenüberstellung und Bewertung verschiedener Ansätze, um deren Stärken und Schwächen herauszuarbeiten und eine fundierte Empfehlung für die akademische und kommerzielle Praxis zu formulieren.

1.2 Anwendungspraxis

Ausgehend von verkehrsplanerischen Fragestellungen wurden folgende Berechnungsansätze für Binnendistanzen recherchiert:

- a) Fläche als Kreis annehmen, mit Radius r dieses Kreises Binnendistanz d berechnen:
 - $d = r$ (Siedentop, 2007),
 - $d = r/3$ (Einig & Pütz, 2007),
 - $d = r \cdot x$, mit x als gemeindegrößenspezifischem Faktor (Guth et al. (2010) basierend auf KONTIV¹ 1989),
 - $d = 0,44 + 0,58 \cdot r$ (Mercier, 2007);
- b) Kleinstes umgebendes Rechteck ermitteln und mittlere Kantenlänge bestimmen (Thiesen, 2016);
- c) Fläche als Quadrat annehmen und halbe Kantenlänge bestimmen (Thiesen, 2016);
- d) Fläche als Quadrat annehmen, Berechnung der mittleren Binnendistanz des Rechtsecks nach (Burgstaller & Pillichshammer, 2008);
- e) Kleinstes umgebendes Rechteck ermitteln, Berechnung der mittleren Binnendistanz des Rechtsecks nach (Burgstaller & Pillichshammer, 2008);
- f) Ableitung aus der Distanz zu nächsten Nachbarn (Martin & McGuckin, 1998);
- g) Ableitung aus dem Umfang der Fläche;

¹ KONTIV = Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten, Vorläufer der bundesweiten Mobilitätserhebung „Mobilität in Deutschland (MiD)“, s. <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/index.html>

- h) Mittelwert gemessener Luftliniendistanzen zwischen zufällig ausgewählten Punkten, z. B. Lande (2011), Thiesen (2016);
- i) Mittelwert im Straßennetz gemessener Distanzen zwischen zufällig ausgewählten Punkten.

Die ersten drei Ansätze (a-c) gehen von einem exponentiellen Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Binnendistanz und Fläche aus, wobei die Umrechnung der Einheiten (Ableitung der Länge aus der Fläche) einen kausalen Zusammenhang nahelegt, der für definierte geometrische Formen besteht, in den ersten drei Ansätzen jedoch nur anhand von Erfahrungswerten quantifiziert wird. Bei den Ansätzen d) und e) wird die mittlere Binnendistanz exakt berechnet, allerdings nur für Rechtecke, die die tatsächliche Gestalt der Fläche mehr oder weniger stark vereinfachen.

Die Berechnung der mittleren Binnendistanz anhand des Kreisradius ist eher für kleine, geografisch homogene Flächen geeignet (Horner & Murray, 2002). Dieses Urteil dürfte für andere Ansätze gelten, die die örtliche Topografie mit geografischen Barrieren etc. vernachlässigen. Die Ableitung der Binnendistanz aus den gemessenen Distanzen zu benachbarten Flächen (f) berücksichtigt die Topografie in der betreffenden Region zumindest anteilig. Dieser Ansatz ist in der Verkehrsplanungssoftware Visum für die Berechnung relationaler Kenngrößen in Matrixform implementiert und stellt für Distanzmaße wie die Umsteigehäufigkeit im ÖPNV den einzigen mit verhältnismäßigem Aufwand einsetzbaren Ansatz dar.

Für die Berücksichtigung des Umfangs der Fläche (g) wurde kein Anwendungsfall gefunden. Offensichtlich wird sich hier die Genauigkeit bzw. Detaillierung der Flächenumgrenzung auswirken, wenn z. B. eine Flächengrenze einem mäandrierenden Fließgewässer folgt. Bei einheitlichen Datensätzen könnte trotzdem eine hinreichende Korrelation zwischen Umfang und Binnendistanz bestehen.

Experimentell kann die Binnendistanz mithilfe einer Stichprobe zufälliger Punktpaare aus der Fläche berechnet werden (h, i). Mit der Auswahl der Punkte tritt ein grundlegendes Problem der Thematik in den Vordergrund: der konkrete fachliche Bezug der Distanzbestimmung. Ist die Distanz zwischen gleichartigen oder verschiedenen Objekten bzw. Nutzungs- oder Landbedeckungstypen von Interesse? In der Verkehrsplanung ist es vor allem die Distanz zwischen Orten, an denen verkehrsverursachende Aktivitäten verrichtet werden können – Wohnen, Arbeiten, Einkaufen etc. – und die sich überwiegend in Gebäuden vollziehen. Daher ist hier vor allem die mittlere Distanz unter bebauten Flächen von Interesse.

2 Methode

Die vergleichende Untersuchung der Berechnungsansätze für Binnendistanzen erfolgt anhand der Verwaltungsgebiete von Deutschland, die das Geodatenzentrum im Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)² für den Maßstab 1:250.000 auf unterschiedlichen Verwaltungsebenen zur Verfügung stellt. Für diese Betrachtung wurden die Flächen von 431 Kreisen und 11.395 Städten und Gemeinden aus dem Datensatz mit Stand 31.12.2017 verwendet. Der Datensatz beinhaltet Einwohnerzahlen, aus denen sich die gemeindegrößenspezifischen Faktoren von Guth et al. (2010) ergeben.

² <http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/>

Verwaltungsgebiete, in denen sich kein oder nur ein Knotenpunkt befinden, wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Ebenfalls verworfen wurden 341 Verwaltungsgebiete im Gemeindedatensatz und 30 im Kreisdatensatz ohne Bevölkerung (z. B. gemeindefreie Gebiete und Wasserflächen). Die Anzahl der berücksichtigten Kreispolygone beläuft sich daher auf 401, die der Gemeindepolygone auf 10.287.

Die geometrischen Berechnungen wurden in PostGIS/PostgreSQL implementiert. Hingewiesen sei darauf, dass das für Ansatz e) erforderliche kleinste umgebende Rechteck nicht einer beliebigen „Bounding Box“ entspricht, sondern als „Minimum Area Rectangle“ zu bestimmen ist (vgl. Eberly, 2015). Die Messung der Distanzen im Straßennetz erfolgt mithilfe des Netzmodells der Bundesverkehrswegeplanung (BVU et al., 2014). Dabei werden für zufällig ausgewählte Punkte in der Fläche der jeweils nächstgelegene Knotenpunkt im Straßennetz innerhalb der jeweiligen Fläche bestimmt und als Ausgangs- bzw. Zielpunkt der Routingabfrage verwendet. Knotenpunkte finden sich im Netzmodell an Kreuzungen und Verzweigungen des Straßennetzes sowie an Orten, an denen sich wesentliche Parameter einer Strecke, wie z. B. die Klassifikation oder die zulässige Höchstgeschwindigkeit, ändern. Eine Verschnidung der Knoten mit dem clc10-Datensatz³ des BKG ergab, dass fast die Hälfte der Knoten in städtisch oder i.w.S. gewerblich geprägten Flächen liegen (Abb. 1).

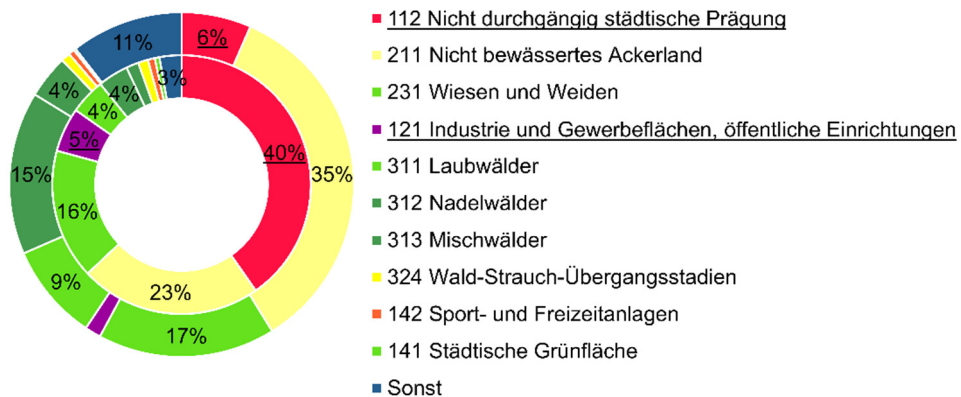


Abb. 1: Anteile der clc10 – Nutzungstypen an der Gesamtfläche im Außenring und Lage der Knotenpunkte des BVWP-Netzmodells nach Flächennutzung im Innenring, städtische und im weiteren Sinne gewerblich geprägte Anteile unterstrichen

Die Anzahl der Abfragen für Ansätze h) und i), Messung der Luftliniendistanz und der Distanz im Straßennetz, wird bestimmt, indem auf Grundlage der Standardabweichung der gerouteten Distanzen in einer ersten Stichprobe mit $n_1 = 25$ Abfragen die Stichprobengröße $n_2 = (1,96 \cdot s / e)^2$ für eine Sicherheit von 95 % und eine Genauigkeit e von 5 % berechnet wird. Wo die so berechnete Stichprobe $n_2 < 25$ ergab, wurde mit den Ergebnissen der ersten Stichprobe weiter gerechnet.

³ Corine Land Cover 10 ha, Referenzjahr 2012

Bei der Auswertung werden die Ergebnisse der Distanzmessungen für Luftlinie und Straßennetz als maßgebliche Richtwerte verwendet. Diese berücksichtigen die spezifische Geometrie und das Straßennetz der Verwaltungsgebiete, sind im Kontext umfangreicherer Modellrechnungen jedoch relativ aufwendig zu ermitteln. Diese beiden Kennwerte werden denen Werten der übrigen Ansätze gegenübergestellt und

- das Bestimmtheitsmaß R^2 ,
- die Wurzel des gemittelten Fehlerquadrate (Root Mean Squared Error RMSE),
- die prozentuale Wurzel der gemittelten Fehlerquadrate (%RMSE),
- der Mittelwert der Absolutbeträge der prozentualen Abweichung (Mean Absolute Percentage Error MAPE), ein gängiger Qualitätskennwert in der Verkehrsmodellierung (Klein & Löwa, 2019),
- die Steigung und
- der y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden

berechnet. Letztere kann Aufschluss über zweckmäßige Anpassung der Formeln zur Schätzung der mittleren Binnendistanz geben. Die Parameter a (2) und b (1) der Regressionsgeraden $y = a + b \cdot x$ berechnen sich folgendermaßen:

$$b = \frac{\frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

mit: x: unabhängige Variable bzw. maßgebliche Richtwerte

y: abhängige Variable

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2)$$

Der MAPE – Wert berechnet sich mit folgender Formel (3):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_i \frac{|y_i - x_i|}{x_i} [\%] \quad (3)$$

Ergänzt wird die rechnerische Analyse der unterschiedlichen Binnendistanzwerte durch eine visuelle Begutachtung und Diskussion ausgewählter Streudiagramme und Lagepläne.

3 Ergebnisse

Bei Gemeindepolygonen wurden in insgesamt ca. 150 Fällen Stichprobengrößen unter 25 berechnet, beispielsweise berechnet sich die Stichprobengröße bei Verwaltungsgebieten mit nur 2 Knotenpunkten zu 1. In diesen Fällen wurden die vorläufig berechneten Distanzwerte auf Grundlage einer Stichprobengröße von 25 verwendet. Die zwischen zufälligen Punkten gemessenen Luftliniendistanzen sowie die im Straßennetz gemessenen Distanzen werden im Folgenden als gemessene Distanzwerte bezeichnet, die übrigen als geschätzte Distanzwerte.

Die Ergebnisse sind in vier Tabellen für die Ergebnisse in Bezug auf die als Luftliniendistanz (Tabelle 1 und 2) und in Bezug auf die im Straßennetz gemessene Binnendistanz (Tabelle 3

und 4) dokumentiert. Die Bandbreite der Streuung wird mittels Streudiagrammen für das jeweils niedrigste und höchste Bestimmtheitsmaß bei den Kreis- und Gemeindepolygonen illustriert (Abb. 2 und 3).

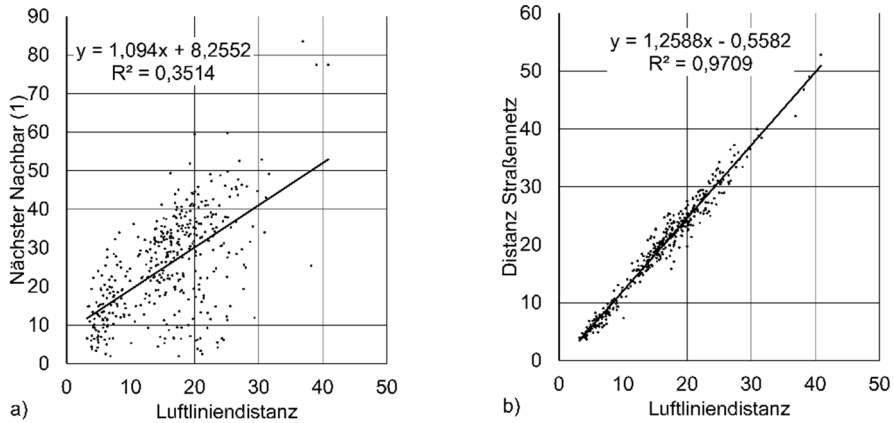


Abb. 2: Streudiagramme für die Faktorkombinationen mit dem niedrigsten (a)) und höchsten (b)) Bestimmtheitsmaß bei Kreisen

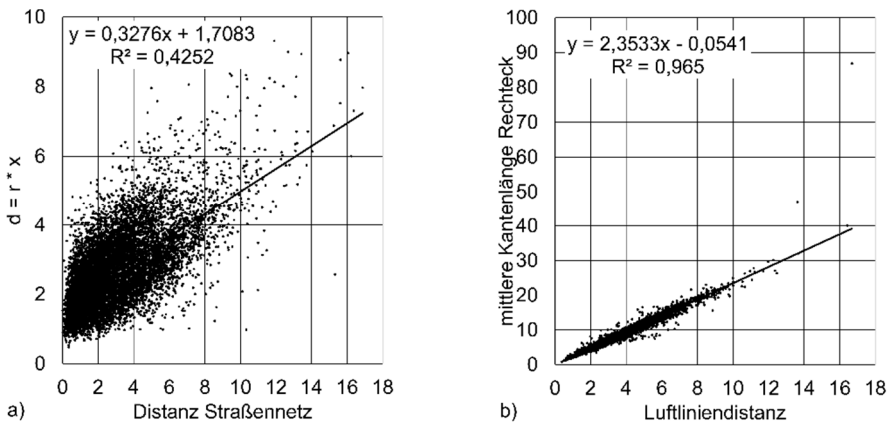


Abb. 3: Streudiagramme für die Faktorkombinationen mit dem niedrigsten (links) und höchsten (rechts) Bestimmtheitsmaß bei Gemeinden

Einleitend ist die Gegenüberstellung der beiden auf unterschiedliche Weise gemessenen Distanzwerte von Interesse: die als Luftlinie und die im Straßennetz gemessenen Binnendistanzen. Das Bestimmtheitsmaß ist auf der Maßstabebene der Kreise hoch (0,97, Tabelle 1 und 3) und liegt der Maßstabebene der Gemeinden immer noch im Mittelfeld der hier berechneten Werte (0,75, Tabelle 2 und 4). Die Steigung der Regressionsgeraden zeigt eine ungefähr

20 bis 25 % höhere Binnendistanz bei der Messung im Straßennetz ($b = 1,26$ bzw. $1,18$, Tabelle 1 und 2 sowie Abb. 2b), was aufgrund der Umwege grundsätzlich plausibel ist.

Tabelle 1: Ergebnisse für 401 Landkreis-Polygone in Bezug auf Luftliniendistanz, höchste und niedrigste Werte > 0 unterstrichen

Methode	Bestimmtheitsmaß R^2	Regressionsgerade		RMSE	% RMSE	MAPE
		Steigung b	Achsenabschnitt a			
a) Fläche als Kreis annehmen:						
$d = r$	0,965	0,952	0,424	<u>1,361</u>	<u>8,7 %</u>	<u>5,7 %</u>
$d = r/3$	0,965	<u>0,317</u>	0,141	11,633	74,1 %	67,2 %
$d = r \cdot x$	0,954	0,624	0,211	6,362	40,5 %	36,1 %
$d = 0,44 + 0,58 \cdot r$	0,965	0,552	0,246	7,521	47,9 %	42,9 %
b) mittl. Kantenlänge Rechteck	0,935	2,305	0,882	23,679	150,9 %	136,9 %
c) halbe Kantenlänge Quadrat	0,965	0,844	0,376	2,607	16,6 %	12,7 %
d) Binnendistanz Rechteck	0,922	1,217	0,445	4,850	30,9 %	24,9 %
e) Binnendistanz Quadrat	0,965	0,880	0,392	2,082	13,3 %	9,1 %
f) Distanz zu Nachbarn:						
Alle	0,789	1,860	9,885	25,108	160,0 %	167,7 %
nächster (1)	<u>0,351</u>	1,094	8,255	14,362	91,5 %	91,0 %
nächste 2	0,506	1,261	9,656	16,444	104,8 %	109,6 %
nächste 3	0,586	1,403	10,278	18,808	119,9 %	128,0 %
nächste 4	0,644	1,528	10,495	20,782	132,4 %	141,7 %
nächste 5	0,691	1,638	<u>10,573</u>	22,463	143,1 %	152,2 %
g) Umfang	0,849	<u>15,678</u>	<u>-30,462</u>	<u>230,197</u>	<u>1.466,9 %</u>	<u>1.226,4 %</u>
h) gemessene Luftlinien	1,000	1,000	0,000	0,000	0,0 %	0,0 %
i) im Straßennetz gemessen	<u>0,971</u>	1,259	-0,558	4,247	27,1 %	21,5 %

Die Bestimmtheitsmaße für die mit Flächenäquivalenten (Kreis, Quadrat und Rechteck) geschätzten Binnendistanzen liegen mit zwei Ausnahmen über 0,9. Dies gilt gleichermaßen für die Gegenüberstellung mit gemessenen Luftliniendistanzen wie auch mit den im Straßennetz gemessenen Distanzen. Die erste Ausnahme ist die Schätzung der Binnendistanz mithilfe eines von der Bevölkerung abhängenden Faktors ($d = r \cdot x$), der das Bestimmtheitsmaß in Bezug auf die gemessene Luftliniendistanz in Gemeinden auf 0,57 drückt (Tabelle 2). Auch in Bezug auf die im Straßennetz gemessene Distanz fällt das Bestimmtheitsmaß für diesen Ansatz mit 0,43 vergleichsweise niedrig aus (Tabelle 4, Abb. 3a). Die zweite Ausnahme stellen generell die Bestimmtheitsmaße in Bezug auf die im Straßennetz gemessenen Binnendis-

tanzen von Gemeinden dar (Tabelle 4). Bei der Bewertung dieses Ergebnisses ist allerdings zu bedenken, dass das verwendete Netzmodell der BVWP für die Nachfragemodellierung auf Kreisebene entwickelt wurde, sodass ein Teil der Differenzen der unzureichenden Detaillierung des Verkehrsnetzes zuzuschreiben ist.

Tabelle 2: Ergebnisse für 10.287 Gemeinde-Polygone in Bezug auf Luftliniendistanz, höchste und niedrigste Werte > 0 unterstrichen

Methode	Bestimmtheitsmaß R^2	Regressionsgerade		RMSE	% RMSE	MAPE
		Steigung b	Achsenabschnitt a			
a) Fläche als Kreis annehmen:						
d = r	0,947	0,937	0,078	<u>0,384</u>	<u>12,7 %</u>	<u>6,7 %</u>
d = r/3	0,947	<u>0,312</u>	0,026	2,325	77,2 %	67,7 %
d = r · x	0,571	0,517	1,137	1,102	36,6 %	23,2 %
d = 0,44+0,58 · r	0,947	0,544	0,046	1,530	50,8 %	43,7 %
b) mittl. Kantenlänge Rechteck	<u>0,965</u>	2,353	-0,054	4,625	153,5 %	133,7 %
c) halbe Kantenlänge Quadrat	0,947	0,831	0,069	0,605	20,1 %	14,0 %
d) Binnendistanz Rechteck	0,963	1,247	-0,035	0,901	29,9 %	23,6 %
e) Binnendistanz Quadrat	0,947	0,866	0,072	0,512	17,0 %	10,5 %
f) Distanz zu Nachbarn:						
Alle	0,692	1,901	3,190	6,412	212,9 %	223,6 %
nächster (1)	0,564	1,268	1,352	2,838	94,2 %	85,3 %
nächste 2	0,588	1,342	1,899	3,484	115,7 %	113,6 %
nächste 3	0,566	1,385	2,530	4,219	140,1 %	144,4 %
nächste 4	<u>0,543</u>	1,425	3,129	4,931	163,7 %	173,5 %
nächste 5	0,548	1,500	<u>3,501</u>	5,521	183,3 %	196,2 %
g) Umfang	0,923	<u>12,007</u>	<u>-4,175</u>	<u>34,366</u>	<u>1141,0 %</u>	<u>927,9 %</u>
h) gemessene Luftlinien	1,000	1,000	0,000	0,000	0,0 %	0,0 %
i) im Straßennetz gemessen	0,748	1,180	-0,542	1,129	37,5 %	32,2 %

Verhältnismäßig niedrig fallen die Bestimmtheitsmaße für die Schätzung der Binnendistanzen anhand der im Straßennetz gemessenen Distanzen zu einem oder mehreren benachbarten Verwaltungsgebieten aus, den höchsten im Rahmen dieser Untersuchung berechneten Wert erreicht die Berücksichtigung der gemessenen Distanzen zu allen Nachbarn auf Kreisebene mit 0,79 (Tabelle 1), in Bezug zur als Luftlinie gemessenen Binnendistanz. Auf Kreisebene steigen die Bestimmtheitsmaße mit jedem zusätzlichen benachbarten Verwaltungsgebiet, das berücksichtigt wird, allerdings steigen auch alle übrigen ausgewiesenen Kennwerte, bei denen dieser Anstieg negativ zu werten ist (Tabelle 1 und 3).

Tabelle 3: Ergebnisse für 401 Landkreis-Polygone in Bezug auf im Straßennetz gemessene Distanz, höchste und niedrigste Werte > 0 unterstrichen

Methode	Bestimmtheitsmaß R^2	Regressionsgerade		RMSE	% RMSE	MAPE
		Steigung b	Achsenabschnitt a			
a) Fläche als Kreis annehmen:						
d = r	0,954	0,741	1,144	4,724	24,6 %	18,3 %
d = r/3	0,954	<u>0,247</u>	0,381	15,647	81,5 %	72,6 %
d = r · x	0,948	0,487	0,654	10,356	53,9 %	46,7 %
d = 0,44+0,58 · r	0,954	0,430	0,664	11,538	60,1 %	52,3 %
b) mittl. Kantenlänge Rechteck	0,908	1,778	2,925	19,875	103,5 %	98,3 %
c) halbe Kantenlänge Quadrat	0,954	0,657	1,014	6,516	33,9 %	27,2 %
d) Binnendistanz Rechteck	0,894	0,938	1,542	<u>3,007</u>	<u>15,7 %</u>	<u>9,4 %</u>
e) Binnendistanz Quadrat	0,954	0,685	1,057	5,910	30,8 %	24,1 %
f) Distanz zu Nachbarn:						
Alle	0,786	1,453	11,177	21,428	111,6 %	124,9 %
nächster (1)	<u>0,358</u>	0,864	8,837	12,261	63,9 %	66,5 %
nächste 2	0,507	0,988	10,476	13,519	70,4 %	79,9 %
nächste 3	0,585	1,098	11,217	15,568	81,1 %	92,9 %
nächste 4	0,645	1,197	11,512	17,367	90,5 %	103,8 %
nächste 5	0,692	1,283	<u>11,648</u>	18,934	98,6 %	112,3 %
g) Umfang	0,829	<u>12,124</u>	<u>-17,161</u>	<u>226,320</u>	<u>1.178,9 %</u>	<u>1.004,7 %</u>
h) gemessene Luftlinien	<u>0,971</u>	0,771	0,888	4,247	22,1 %	17,3 %
i) im Straßennetz gemessen	1,000	1,000	0,000	0,000	0,0 %	0,0 %

Dabei ist die absolute Größenordnung der Streuungsmaße (RMSE, %RMSE, MAPE) unter verkehrsplanerischen Gesichtspunkten bedenklich hoch, insbesondere im Hinblick auf die Abbildung der nicht motorisierten Nahmobilität mit Reiseweiten im Bereich weniger Kilometer. Einschränkend ist allerdings auch hier die für die Gemeindeebene und den nichtmotorisierten Verkehr unzureichende Detaillierung des Netzmodells zu bedenken. Weiterhin könnten die Streuungsmaße durch entsprechende Faktoren reduziert werden. Die ausgewiesenen Steigungswerte für die Regressionsgeraden liefern hierzu einen ersten Anhaltspunkt.

Tabelle 4: Ergebnisse für 10.287 Gemeinde-Polygone in Bezug auf im Straßennetz gemessene Distanz, höchste und niedrigste Werte > 0 unterstrichen

Methode	Bestimmtheitsmaß R^2	Regressionsgerade		RMSE	% RMSE	MAPE
		Steigung b	Achsenabschnitt a			
a) Fläche als Kreis annehmen:						
d = r	<u>0,751</u>	0,612	1,056	<u>1,149</u>	<u>38,1 %</u>	<u>54,5 %</u>
d = r/3	0,751	<u>0,204</u>	<u>0,352</u>	2,696	89,5 %	62,2 %
d = r · x	<u>0,425</u>	0,328	1,708	1,716	57,0 %	77,1 %
d = 0,44+0,58 · r	0,751	0,355	0,613	1,987	65,9 %	48,1 %
b) mittl. Kantenlänge Rechteck	0,738	1,509	2,485	4,611	153,0 %	228,0 %
c) halbe Kantenlänge Quadrat	0,751	0,543	0,936	1,287	42,7 %	49,0 %
d) Binnendistanz Rechteck	0,731	0,797	1,319	1,345	44,6 %	80,0 %
e) Binnendistanz Quadrat	0,751	0,566	0,976	1,230	40,8 %	50,5 %
f) Distanz zu Nachbarn:						
Alle	0,583	1,279	5,062	6,392	212,1 %	372,4 %
nächster (1)	0,518	0,891	2,486	2,874	95,4 %	151,1 %
nächste 2	0,541	0,943	3,099	3,496	116,0 %	198,1 %
nächste 3	0,516	0,970	3,780	4,225	140,2 %	248,7 %
nächste 4	0,489	0,992	4,433	4,936	163,8 %	296,7 %
nächste 5	0,483	1,032	4,908	5,525	183,4 %	331,5 %
g) Umfang	0,728	<u>7,820</u>	<u>8,423</u>	<u>34,209</u>	<u>1.135,2 %</u>	<u>1.308,4 %</u>
h) gemessene Luftlinien	0,748	0,635	1,097	1,129	37,5 %	57,8 %
i) im Straßennetz gemessen	1,000	1,000	0,000	0,000	0,0 %	0,0 %

Bei den Ergebnissen in Bezug auf die als Luftlinie gemessene Binnendistanz (Tabelle 1 und 2) fällt auf, dass die Steigung der Regressionsgraden für die Schätzung der Binnendistanz als Radius eines flächengleichen Kreises mit am nächsten bei 1,0 liegt ($b = 0,95$ bzw. $0,94$) und damit bei gleichzeitig hohem Bestimmtheitsmaß eine ($R^2 = 0,97$ bzw. $0,95$) eine gute und einfach zu berechnende Näherung darstellt.

Den guten Ergebnissen dieser einfachen Näherung gegenüber stehen die vergleichsweise schlechten Ergebnisse für die Schätzung der Binnenkenngrößen anhand der im Straßennetz gemessenen Distanzen zu den Nachbarn, eine bei der Verkehrsnachfragemodellierung verbreitete Praxis. Diese Berechnungen seien nachfolgend an ausgewählten Beispielen illustriert, bei denen die im Straßennetz gemessene Binnendistanz entweder relativ gut oder relativ schlecht getroffen wird. Die Beispiele werden an den Obergrenzen der 10%- und 90%-Perzentile der Absolutwerte der prozentualen Abweichung der Schätzung mit drei benachbarten Polygonen ausgewählt (Tabelle 5):

1. Stadt Brandenburg, 187 % Abweichung
2. Kreis Recklinghausen, 13 % Abweichung
3. Gemeinde Burggen, 514 % Abweichung
4. Gemeinde Bernau bei Berlin, 40 % Abweichung

Die kreisfreie Stadt Brandenburg westlich von Berlin (Abb. 4) wird fast völlig vom Landkreis Potsdam-Mittelmark umschlossen und grenzt nur auf einem kleinen Abschnitt an den Landkreis Havelland. Beide benachbarten Kreise sind wesentlich größer als die Stadt Brandenburg, die den Flächenschwerpunkten bzw. Zentroiden zugeordneten zentralen Knotenpunkte sind vom zentralen Knotenpunkt der Stadt Brandenburg über 20 km entfernt. Als besonderer Umstand kommen im Nordosten der langgestreckte Beetzsee sowie der Riewendsee hinzu, die der Stadt Brandenburg zugeordnet sind und das zur Schätzung der Binnendistanz herangezogene Rechteck erheblich vergrößern. Dadurch fällt die Schätzung der Binnendistanz anhand der nächsten Nachbarn sowie anhand eines vollumfassenden Rechtecks deutlich zu hoch aus (Tabelle 5).

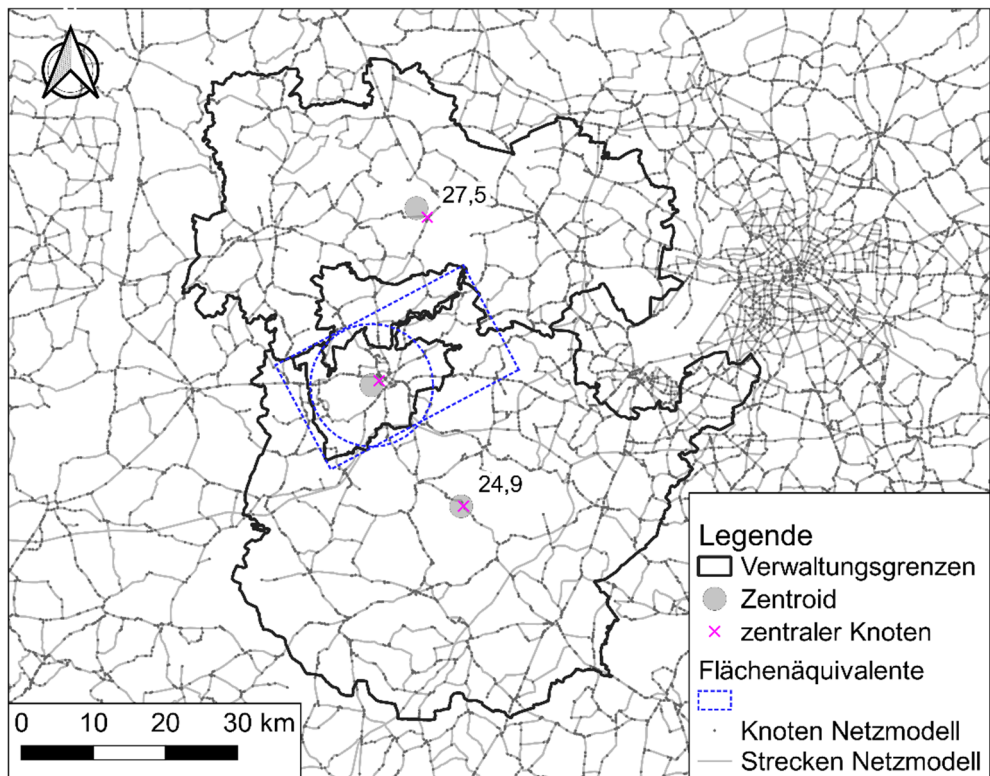


Abb. 4: Kreisgrenzen, Netzmodell, Flächenschwerpunkte (Zentroiden), zugeordnete Knotenpunkte im Netzmodell mit im Netzmodell gemessener Distanz in [km] und Flächenäquivalente zur Schätzung der Binnendistanz für Brandenburg

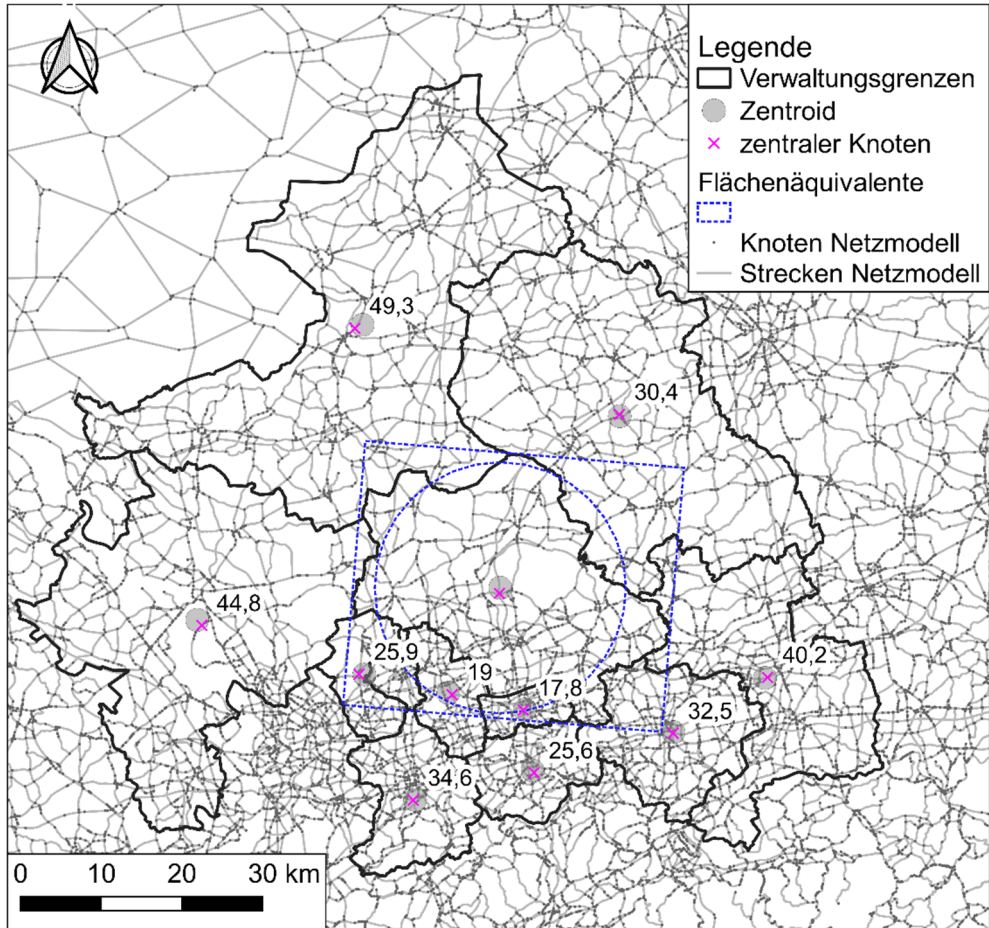


Abb. 5: Kreisgrenzen, Netzmodell, Flächenschwerpunkte (Zentroide), zugeordnete Knotenpunkte im Netzmodell mit im Netzmodell gemessener Distanz in [km] und Flächenäquivalente zur Schätzung der Binnendistanz für Recklinghausen

Der Kreis Recklinghausen am nördlichen Rand des Ruhrgebiets in Nordrhein-Westfalen grenzt im Süden an städtisch geprägte kleinere Kreise, an den übrigen Seiten liegen größere Kreise. Die zentralen Knotenpunkte der südlich gelegenen Kreise Gelsenkirchen und Herne liegen innerhalb des aus dem flächengleichen Kreis abgeleiteten Radius. Die gedrungene Form des Kreises Recklinghausen führt dazu, dass das flächengleiche Rechteck nicht wesentlich größer ausfällt als der Kreis selbst. Die unterschiedlich großen benachbarten Kreise führen dazu, dass sich die Schätzung der Binnendistanz anhand benachbarter Bezirke mit jedem zusätzlichen Kreis, der in der Berechnung berücksichtigt wird, verschlechtert (Tabelle 5).

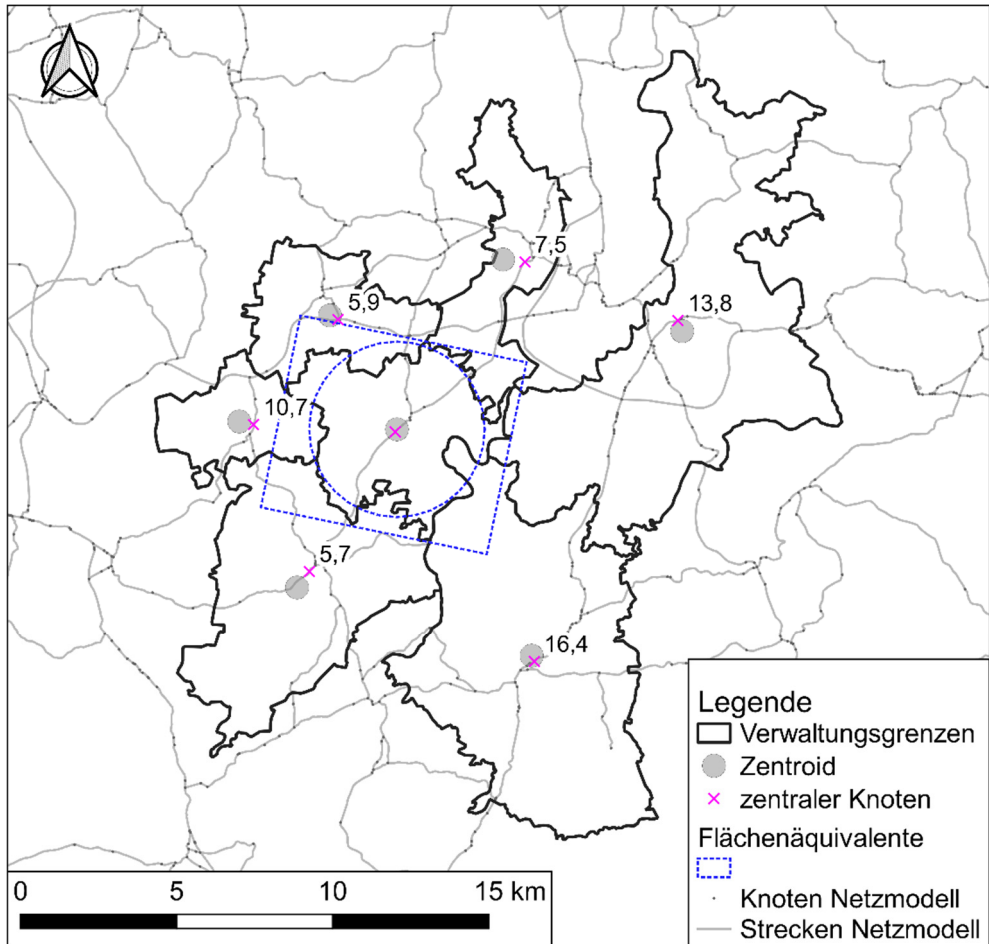


Abb. 6: Gemeindegrenzen, Netzmodell, Flächenschwerpunkte (Zentroide), zugeordnete Knotenpunkte im Netzmodell mit im Netzmodell gemessener Distanz in [km] und Flächenäquivalente zur Schätzung der Binnendistanz für Burggen in Bayern

Die Gemeinde Burggen liegt nördlich der Alpen zwischen München und Kempten im Allgäu, unweit der deutsch-österreichischen Grenze bei Füssen (Abb. 6). Die Knotenpunkte des BVWP-Netzes liegen überwiegend im bebauten Gebiet im Zentrum der Gemeinde, der Ortsteil Tannenberg im Westen der Gemeinde ist im Netzmodell nicht abgebildet. Es ergibt sich eine sehr kurze im Straßennetz gemessene Binnendistanz, mit einer Ausnahme liegen alle geschätzten Binnendistanzwerte deutlich über der im Straßennetz gemessenen Distanz (Tabelle 5). Aufgrund der Topografie und der teilweise ungünstigen Form der benachbarten Gemeinden – Rettenbach am Auerberg im Westen bzw. Altstadt im Norden – errechnen sich im Straßennetz relativ große Distanzen, sodass die auf dieser Grundlage geschätzten Werte zu den höchsten berechneten Werten zählen.

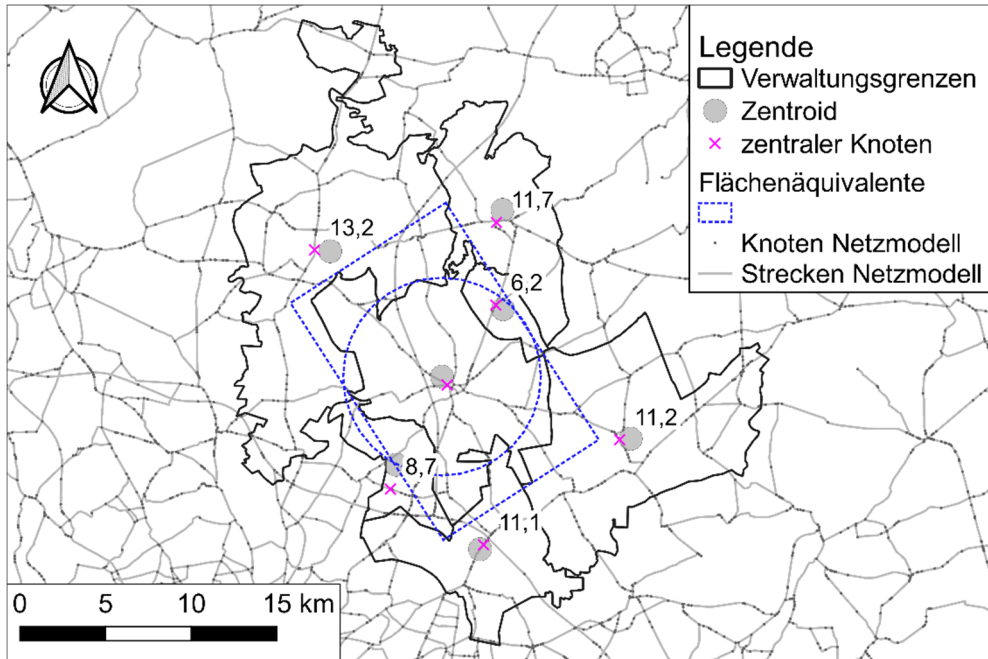


Abb. 7: Gemeindegrenzen, Netzmodell, Flächenschwerpunkte (Zentroide), zugeordnete Knotenpunkte im Netzmodell mit im Netzmodell gemessener Distanz in [km] und Flächenäquivalente zur Schätzung der Binnendistanz für Bernau bei Berlin

Die Gemeinde Bernau im Nordosten von Berlin grenzt wie der Kreis Recklinghausen an einige deutlich kleinere Verwaltungsgebiete (Abb. 7). Die Strecken zu den zentralen Knotenpunkten der benachbarten Gemeinden sind relativ geradlinig. Die Berücksichtigung der Distanzen im Straßennetz führt daher nur zu einer moderaten Überschreitung der im Netz gemessenen Binnendistanz, die ihrerseits infolge der gleichmäßig über die Gemeindefläche verteilten Knotenpunkte relativ hoch ausfällt – höher als der Radius des flächengleichen Kreises (Tabelle 5)

Tabelle 5: Ergebnisse der Schätzung und Messung der Binnendistanz für zwei Kreise und zwei Gemeinden, in [km]

Methode / Verwaltungsgebiet	Kreis Brandenburg	Kreis Recklinghausen	Gemeinde Burggen	Gemeinde Bernau bei Berlin
a) Fläche als Kreis annehmen:				
$d = r$	8,5	15,6	2,8	5,8
$d = r/3$	2,8	5,2	0,9	1,9
$d = r \cdot x$	5,4	9,2	3,5	3,6
$d = 0,44 + 0,58 \cdot r$	5,0	9,0	1,6	3,4

Tabelle 5 (Fortsetzung)

Methode / Verwaltungsgebiet	Kreis Brandenburg	Kreis Reckling- hausen	Gemeinde Burggen	Gemeinde Bernau bei Berlin
b) mittl. Kantenlänge Rechteck	23,0	36,2	6,8	13,6
c) halbe Kantenlänge Quadrat	7,6	13,8	2,5	5,1
d) Binnendistanz Rechteck	12,2	18,9	3,6	7,2
e) Binnendistanz Quadrat	7,9	14,4	2,6	5,3
f) Distanz zu Nachbarn:				
Alle	26,2	32,0	10,0	10,4
nächster (1)	24,9	17,8	5,7	6,2
nächste (2)	26,2	18,4	5,8	7,5
nächste (3)	26,2	20,8	6,4	8,7
nächste (4)	26,2	22,1	7,5	9,3
nächste (5)	26,2	23,7	8,7	9,8
g) Umfang	140,9	195,2	41,9	76,5
h) gemessene Luftlinien	8,5	15,4	2,9	6,0
i) im Straßennetz gemessen	9,1	18,4	1,0	6,2

4 Diskussion

In methodischer Hinsicht wirft die vorstehende Untersuchung einige Fragen zur Handhabung von Binnendistanzen bei der Arbeit mit räumlichen Aggregaten auf. Dabei ist an erster Stelle anzuerkennen, dass die hier als zentrale Bezugsgröße verwendete im Straßennetz gemessene Binnendistanz nicht über jeden Zweifel erhaben ist. Rein rechnerisch wäre es möglich, eine eher analytische statt experimentelle Lösung des Problems zu finden, indem anstelle einer zufälligen Auswahl von Routen innerhalb eines Verwaltungsgebietes eine Berechnung aller möglichen Routen vorgenommen wird, über deren Distanzwerte anschließend ein zweckmäßig gewichtetes Mittel gebildet wird. Eine zweckmäßige Wichtung könnte dabei durch Verschneidung der Verwaltungsgebietsfläche mit auf Grundlage der Stützpunkte gebildeten Voronoipolygonen aufbauen. Ob diese Herangehensweise effizienter ist, ist in Anbetracht der Stichprobengrößen im überwiegend mittleren dreistelligen Bereich jedoch fraglich.

Weiterhin ist einschränkend darauf hinzuweisen, dass das verwendete Netzmodell der BVWP zuvorderst das überörtliche Verkehrsnetz für den motorisierten Individualverkehr darstellt und, wie auch die Streuungsmaße und die erörterten Einzelfälle zeigen, für Betrachtungen auf Gemeindeebene nicht überall ausreichend detailliert ist. Dieser Aspekt verweist einerseits auf die einleitend aufgeworfene Fragestellung, für welchen sachlichen Bezug die Binnendistanzen ausgewiesen werden – für welche Verkehrsmittel, für welche Wegezwecke, für welche Verkehrsteilnehmer, Güter oder Informationen. Gleichwohl offenbart die hier dargestellte Analyse beachtenswerte Effekte, die eine unzureichende Detaillierung des Verkehrsnetzes

im Kontext der Fragestellung haben kann, z. B. die Verzerrung der Ergebnisse bei kleinräumigen Routingdistanzen auf inner- und zwischengemeindlicher Ebene. Die Abweichungen sind teilweise erheblich und bewegen sich in Größenordnungen, bei denen Nahmobilität und nichtmotorisierte Verkehre vollständig dem Binnenverkehr der Verkehrsbezirke zugeordnet werden. Damit stellt sich auch die Frage, wie realistisch Aussagen zur Verkehrsmittelwahl im Binnenverkehr und zwischen benachbarten Verkehrsbezirken sein können.

Der Aspekt des sachlichen Bezugs der Binnendistanzen ist ein möglicher Erklärungsansatz für die erstaunlich hohen Differenzen zwischen den hier im Netz gemessenen Binnendistanzen und denen von Guth et al. (2010) unter Berücksichtigung der KONTIV-Daten von 1989 geschätzten Werte. In Betracht zu ziehen sind jedoch auch mangelhafte Distanzangaben in den KONTIV-Daten. Eine Analyse auf Grundlage aktueller Mobilitätsenerhebungen wie der MiD2017 könnte dazu beitragen, diese Problematik zu erhellen.

Die exemplarische Untersuchung einzelner Gebiete zeigt, wie sich die individuellen räumlichen Gegebenheiten auf die Qualität der Schätzung der Binnendistanzen auswirken können. Die Schätzung anhand der umgebenden Rechtecke funktioniert nicht, wenn ungünstig geschnitten sind, also z. B. langgestreckt oder ringförmig sind oder über Exklaven verfügen. Dies kann sich auch negativ auf die Schätzung anhand der Distanzen zu benachbarten Gebieten auswirken. Bei der Schätzung anhand der Distanzen zu benachbarten Gebieten führen darüber hinaus stark abweichende Gebietsgrößen in der Nachbarschaft, inhomogene Flächennutzung im Gebiet sowie topografisch oder durch unvollständige Netzabbildung bedingte Umwege in den gerouteten Strecken gegenüber der Luftliniendistanz zu fragwürdigen Ergebnissen.

Inhaltlich ergeben sich aus dieser Untersuchung einerseits Hinweise für die Modellierung des Verkehrsangebots und die Einteilung räumlicher Aggregate: Neben einer angemessenen Detaillierung des Verkehrsnetzes trägt ein gleichmäßig kompakter Zuschnitt räumlicher Aggregate zur einer besseren Qualität aggregierter relationaler Kennwerte wie der Binnendistanzen und anderer kleinräumiger Entfernungsmaße bei. In einigen Fällen wird es zweckmäßiger sein, die Gebietseinteilung zu verfeinern, als den Aufwand für die Berechnung der Binnendistanzen zu erhöhen. Fraglich ist, inwieweit derartigen Vorgaben Rechnung getragen werden kann, während z. B. die Erstellung von Modelldatenbanken zunehmend automatisiert wird und Verkehrsbezirke entsprechend automatisch aus Verwaltungsgebieten, statistischen Bezirken und Flächennutzungsplänen generiert werden. Hier wäre eine vertiefende Analyse anhand operationaler Verkehrsnachfragemodelle zweckmäßig, bei der auch die Problematik unterschiedlicher Verkehrsmittel behandelt werden könnte.

Im Hinblick auf die forschungsleitende Fragestellung, d. h. die Beurteilung der unterschiedlichen Ansätze zur Schätzung der Binnendistanz ist für die hier betrachteten Verwaltungsgebiete und insbesondere die Kreise festzustellen, dass der Radius eines flächengleichen Kreises den besten Näherungswert für die im Straßennetz gemessene Binnendistanz darstellt, der durch Skalierung mit der Steigung der Regressionsgeraden noch geringfügig verbessert werden kann. Sofern die Luftliniendistanz von Interesse ist, sei darauf hingewiesen, dass deren experimentelle Berechnung in der hier geschilderten Form in PostGIS mit vertretbarem Aufwand auch für mehrere tausend Polygone berechnet werden kann.

Literatur

- Brannolte, U. (2000). Simulationsmodelle im Verkehrswesen – Analyse und spezifische Weiterentwicklungen. *Straßenverkehrstechnik*, (6), 265–269.
- Burgstaller, B., & Pillichshammer, F. (2008). *The average distance between two points*. Retrieved Jan 04, 2019, from <https://www.semanticscholar.org/paper/The-average-distance-between-two-points-Burgstaller-Pillichshammer/76803e21c4cc2d7bfabd6ccdf3fb30bc76fb75bd>.
- BVU, ITP, IVV, Planco (2014). *Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (Schlussbericht) Los3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs*. Forschungsbericht FE-Nr.: 96.0981/2011, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- Cerwenka, P. (2002). Verkehrsnachfragemodelle: Irrlichter im Labyrinth der Wirklichkeit? *Straßenverkehrstechnik*, (6), 281–283.
- Eberly, D. (17. Mai 2015). *Minimum-Area Rectangle Containing a Set of Points*. Retrieved Jan 11, 2019, from <https://www.geometrictools.com/Documentation/MinimumAreaRectangle.pdf>.
- Einig, K., & Pütz, T. (2007). Regionale Dynamik der Pendlergesellschaft – Entwicklung von Verflechtungsmustern und Pendlerdistanzen. *Informationen zur Raumentwicklung*, (2007), 72–91.
- Guth, D., Holz-Rau, C., Maciolek, M., & Scheiner, J. (11. Mai 2010). Beschäftigungssuburbanisierung, Siedlungsstruktur und Berufspendelverkehr – Ergebnisse für deutsche Agglomerationsräume 1999-2007. *Raumordnung und Raumforschung*, (2010), 283–295.
- Horner, M. W., & Murray, A. T. (2002). Excess Commuting and the Modifiable Areal Unit Problem. *Urban Studies*, 39, 131–139.
- Kanaroglou, P. S., Higgins, C. D., & Chowdhury, T. A. (April 2015). Excess Commuting: A Critical Review and Comparative Analysis of Concepts, Indices, and Policy Implications. *Journal of Transport Geography*, 44, 13–23.
- Klein, T., & Löwa, S. (5. August 2019). Applying measures of modeling quality to a national time series: a benchmark for transport demand models. *Transportation Planning and Technology*, 1–17.
- Lande, J. (23. Februar 2011). *An Introduction to Monte Carlo*. A Retrieved Jan 04, 2019, from <https://www.slac.stanford.edu/slac/sass/talks/MonteCarloSASS.pdf>.
- Martin, W. A., & McGuckin, N. A. (1998). *NCHRP Report 365: Travel Estimation Techniques for Urban Planning*. (Transportation Research Board, Ed.) Washington, D.C.: National Academy Press.
- Mercier, S. (2007). Se rendre à son travail: accessibilité de l'emploi francilien selon les activités. In: D. Pumain et al. (Eds.), *Données urbaines* (pp. 97–111). Economica.
- Siedentop, S. (2007). Auswirkungen der Beschäftigungssuburbanisierung auf den Berufsverkehr – Führt die Suburbanisierung der Arbeitsplätze zu weniger Berufsverkehr? *Informationen zur Raumentwicklung*, (2007), 105–124.
- Thiesen, M. (2016). *Untersuchung der deutschen Pendlerverflechtungen und ihrer Relevanz für die Modellierung der Verkehrsnachfrage* (Masterarbeit). HafenCity Universität Hamburg.