

Vergleich von Straßennetzen hinsichtlich der Theorie komplexer Netze

Seminararbeit

Theodor Diesner-Mayer
theo.dm94@googlemail.com
Matrikelnummer 6861920

Heinrich Böllmann
Heinrich.Boellmann@gmx.net
Matrikelnummer 4960530

18. Februar 2024

Inhalt

Einleitung.....	3
Motivation	3
Zielsetzung.....	3
Forschungsstand.....	4
Repräsentation von Straßennetzen als Graphen.....	4
Primale Repräsentation des Straßennetzes.....	4
Duale Repräsentation des Straßennetzes.....	4
Eigenschaften von komplexen Netzen.....	6
Zentralitätsmetriken	7
Robustheitsanalyse.....	9
Methodik	9
Ableiten des primalen Graph aus OSM-Daten	9
Ableiten des dualen Graphen aus dem primalen Graphen	10
Datenbasis für die untersuchten Gemeinden	11
Bessere Performance durch das Zusammenspiel von graph-tool und NetworkX.....	12
Analyse der Robustheit.....	12
Verfügbarkeit der Ergebnisse	13
Ergebnisse.....	13
Grundlegende Kennzahlen der Straßennetze.....	13
Small-World-Eigenschaften	14
Skalenfreiheit.....	17
Zentralitätsmaße	18
Robustheit	20
Diskussion.....	23
Small-World-Eigenschaften	23
Skalenfreiheit.....	24
Robustheit	24
Einschränkungen	25
Ausblick	25
Fazit	26
Literaturverzeichnis	27
Abbildungsverzeichnis.....	28

Einleitung

Motivation

Reale, komplexe Netze weisen im Vergleich zu einfachen Netzwerken besondere topologische Eigenschaften auf, da es sich um gewachsene Strukturen handelt, die nicht auf einfachen Erzeugungsregeln oder auf Zufall basieren. Ein Beispiel für reale, komplexe Netzwerke stellen Verkehrsnetze dar. Straßennetze bieten im Rahmen einer Seminararbeit ein attraktives Forschungsobjekt an, da sie Lesern und Autoren aus der eigenen Lebenserfahrung bekannt sind, ohne besondere Fachkenntnis eine anschauliche Diskussion ermöglichen und sich grafisch meist recht übersichtlich darstellen lassen. Außerdem liegt aus Crowdsourcing-Projekten wie dem OpenStreetMap-Projekt¹ ein umfangreicher und frei nutzbarer Datenbestand zu öffentlichen Verkehrswegen vor.

Straßennetze von Städten und Gemeinden sind eng verbunden mit ihrer Topografie sowie ihrer Entwicklungsgeschichte und städteplanerischer Konzepte. Es ist zu erwarten, dass Besonderheiten eines Straßennetzes sich auch im zugehörigen Graphen niederschlagen.

Eine wichtige Eigenschaft von Verkehrsnetzen ist ihre Robustheit, also die Widerstandsfähigkeit eines Netzwerks gegenüber Ausfällen von Knoten oder Kanten. In der Realität gibt es regelmäßig geplante (z.B. Baustellen, angemeldete Demonstrationen) oder ungeplante (z.B. Unfälle, Wetterereignisse, Anschläge) Störungen. Diese können im günstigsten Fall mit Verkehrsumleitungen abgefangen werden. Im ungünstigsten Fall kommt es zum Verkehrsstillstand und zur Nicht-Erreichbarkeit von Teilen des Netzes.

Zielsetzung

Straßennetze lassen sich auf verschiedene Weisen als Graph repräsentieren. Im Rahmen dieser Seminararbeit sollen zwei solcher Graphenrepräsentationen (Repräsentation als primaler Graph und als dualer Graph) anhand deutscher Gemeinden und Städte hinsichtlich aussagekräftiger Kennwerte untersucht werden. Insbesondere sollen die Graphen auf die Small-World-Eigenschaft und die Skalenfreiheit untersucht werden. In diesem Rahmen soll auf die Eigenschaften sowie Anwendungsgebiete der verschiedenen Repräsentationen eingegangen werden.

Weiterhin werden die Straßennetze der untersuchten deutschen Städte und Gemeinden hinsichtlich ihrer Robustheit ausgewertet. Hierfür wird die Anfälligkeit der Netze gegenüber dem Ausfall von zufälligen oder systematisch ausgewählten Kanten beziehungsweise Knoten untersucht. Dabei sollen kritische Stellen identifiziert werden, die einen besonders großen Einfluss auf die Robustheit des Gesamtnetzes haben. Die Ergebnisse der Untersuchung werden anhand der realen Welt eingeordnet und diskutiert.

In dieser Arbeit wird lediglich das allgemeine Straßennetz, welches durch Kraftfahrzeuge öffentlich befahrbar ist, untersucht. Private Straßen, Wander- beziehungsweise Radwege sowie Wirtschaftswege werden nicht betrachtet.

¹ OpenStreetMap contributors (2017). Verfügbar unter <https://www.openstreetmap.org>.

Forschungsstand

Als komplexe Netze werden Netzwerke beziehungsweise Graphen bezeichnet, deren Kanten weder rein zufällig noch rein schematisch verbunden sind. Solche Netze sind in realen Netzen, so auch in der Betrachtung des Straßennetzes als Graphen zu finden und weisen Besonderheiten auf [1].

Repräsentation von Straßennetzen als Graphen

Es gibt mehrere Ansätze, Straßennetze als Graphen zu repräsentieren. In der Literatur sind zwei Ansätze häufig zu finden, die auch in dieser Arbeit zur Anwendung kommen sollen. Zum einen gibt es die Methode des primalen Graphen (so z.B. Porta et al. in „The network analysis of urban streets: a primal approach“, auch Space L genannt) bei denen die Kreuzungen zwischen Straßenabschnitten als Knoten und die Straßenabschnitte zwischen Kreuzungen als Kanten aufgefasst werden [2], [3]. Zum anderen gibt es die Methode des dualen Graphen, bei der Straßen als Knoten aufgefasst werden und eine Kante zwischen zwei Straßen besteht, falls es eine Kreuzung gibt, welche diese verbindet (so z.B. Porta et al. in „The network analysis of urban streets: A dual approach“ auch Space P genannt) [3], [4].

Primale Repräsentation des Straßennetzes

Bei der primalen Repräsentation des Straßennetzes werden Kreuzungen zwischen mindestens zwei Straßenabschnitten sowie Straßenenden zu einem eigenen Knoten. Die zwischen Kreuzungen liegenden Straßenabschnitte werden zu Kanten. Die primale Repräsentation des Straßennetzes ist einfach darstellbar. Der resultierende Graph hat eine räumliche Dimension. Die Knoten enthalten geografische Koordinaten und die Kanten die geografischen Koordinaten der zugehörigen Straßenabschnitte. Zusätzlich lassen sich die Kanten um weitere räumliche Informationen, wie der Distanz zwischen den Kreuzungen, der Straßenkapazität oder der voraussichtlichen Reisezeit erweitern.

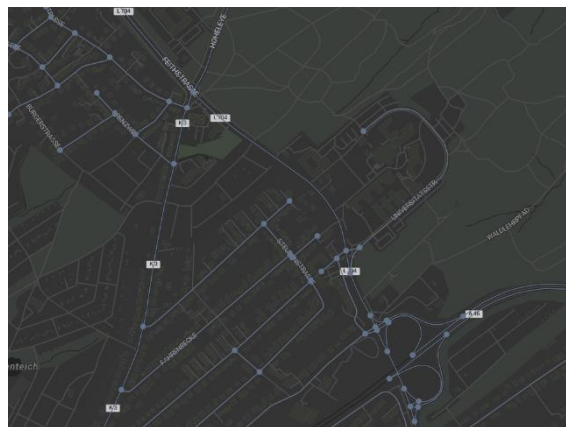


Abbildung 1: Primale Repräsentation des Straßennetzes eines kleinen Ausschnitts der Stadt Hagen, Nordrhein-Westfalen, Deutschland.²

Mit diesen räumlichen Informationen lässt sich der Graph auf einer Landkarte einfach und anschaulich visualisieren. Außerdem eignet sich der Graph für die Analyse des Verkehrsflusses, der Verkehrswege und kann als Basis für die Routenplanung dienen [3].

Duale Repräsentation des Straßennetzes

Bei der dualen Repräsentation des Straßennetzes werden ganze Straßen einschließlich des Kreuzungsgebietes als ein Knoten betrachtet. Sind zwei Straßen durch mindestens eine Kreuzung

² Kartenmaterial: Stadia-Maps (<https://stadiamaps.com/>) [© Stadia Maps © OpenMapTiles © OpenStreetMap]

direkt miteinander verbunden, besteht im dualen Graphen eine Kante zwischen ihnen. Aus welchen Straßenabschnitten eine Straße in diesem Sinne besteht, ist jedoch zu definieren. Es gibt es verschiedene Vorgehensweisen. Im einfachsten Fall kann der Straßenname selbst oder die Bezeichnung der Straße (z.B. bei Bundesstraßen oder Autobahnen) als vereinigende Eigenschaft dienen. Jedoch können diese Bezeichnungen dahingehend problematisch sein, als dass sie mit den tatsächlichen räumlichen Verlauf der Straße nicht oder nicht mehr viel zu tun haben [4]. Beispielsweise können Straßen mit gleicher Bezeichnung nicht zusammenhängend sein (vgl. Abbildung 2) oder Straßenverläufe mit unterschiedlichen Bezeichnungen (vgl. Abbildung 3) rein funktional betrachtet eine einzige Straße darstellen. Porta et al. [4] und darauf aufbauend Massuci et al. [5] schlagen stattdessen einen räumlichen Ansatz vor: Straßenabschnitte werden anhand der räumlichen Kontinuität, welcher durch die Winkel der Straßenabschnitte zueinander bestimmt wird, zu Straßen und damit Knoten im dualen Graphen zusammengefasst.

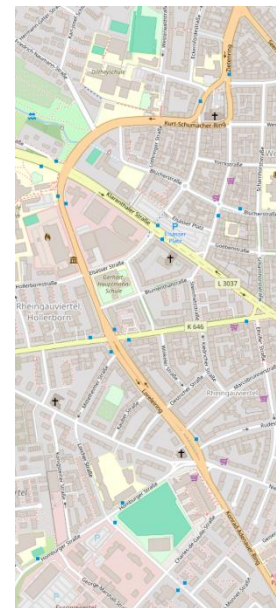
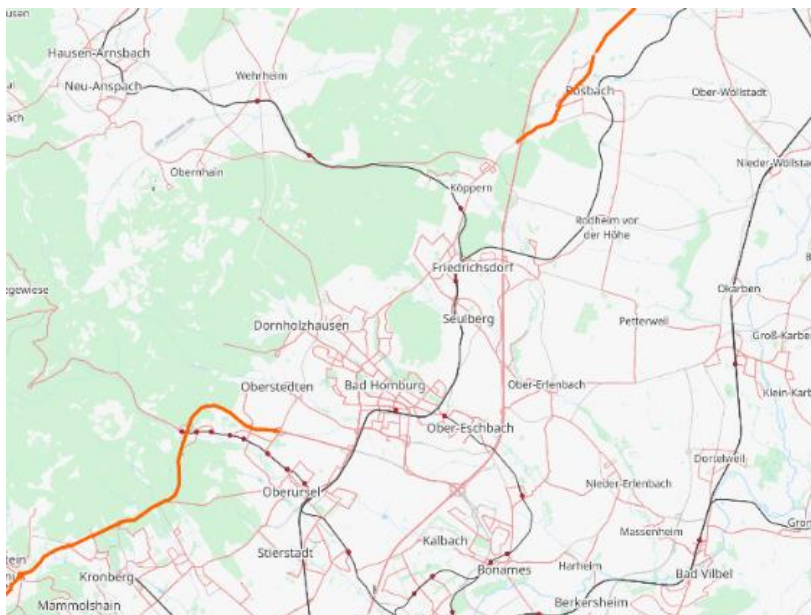


Abbildung 2 (links): Die Bundesstraße 455 in Südhessen endet wegen Baus der Autobahnen A661 und A5. Der Name ist historisch bedingt, jedoch ist er nicht mehr repräsentativ für die Funktion der Straßen im Straßennetz. Räumlich handelt es sich um zwei unterschiedliche Straßen.³

Abbildung 3 (rechts): Der umgangssprachlich so genannte „zweite Ring“ in Wiesbaden besteht aus Straßen mit unterschiedlicher Bezeichnung (Zietenring, Loreleiring, ...). Trotz unterschiedlicher Bezeichnungen hat der Straßenzug für das Verkehrsnetz eine vergleichbare Funktion wie die zentral gelegene Hauptstraße.⁴

Der daraus resultierende Graph lässt sich nicht mehr so einfach darstellen. Vielmehr ergibt sich hier das bekannte Problem, einen Graphen grafisch übersichtlich darzustellen. Als alternative Darstellungsweise ist es auch möglich, den geometrischen Graphen des primalen Graphen als Basis zu verwenden und die Straßen mit unterschiedlichen Farben zu versehen. Die Kanten des dualen Graphen sind nicht explizit dargestellt, jedoch dadurch erkennbar, dass die Straßen durch eine Kreuzung benachbart sind (siehe Abbildung 6 auf Seite 11).

Beim dualen Graphen geht die räumliche Komponente mehr oder weniger verloren. Stattdessen bietet er einen anderen Blickwinkel auf das Straßennetz und ermöglicht es, die Hierarchie und den allgemeinen Aufbau des Straßennetzes zu erfassen. Schon allein hinsichtlich der Knotengerade wird

³ OpenStreetMap contributors (2017). Verfügbar unter <https://www.openstreetmap.org>. (abgerufen am 29.01.2024 im "Verkehrskarte"-Theme)

⁴ OpenStreetMap contributors (2017). Verfügbar unter <https://www.openstreetmap.org>. (abgerufen am 29.01.2024 im "Standard"-Theme)

die Bedeutung einer Straße im Netz deutlich. Das Straßennetz ist bei dieser Betrachtung anderen natürlichen komplexen Netzen in vielen Eigenschaften deutlich näher.

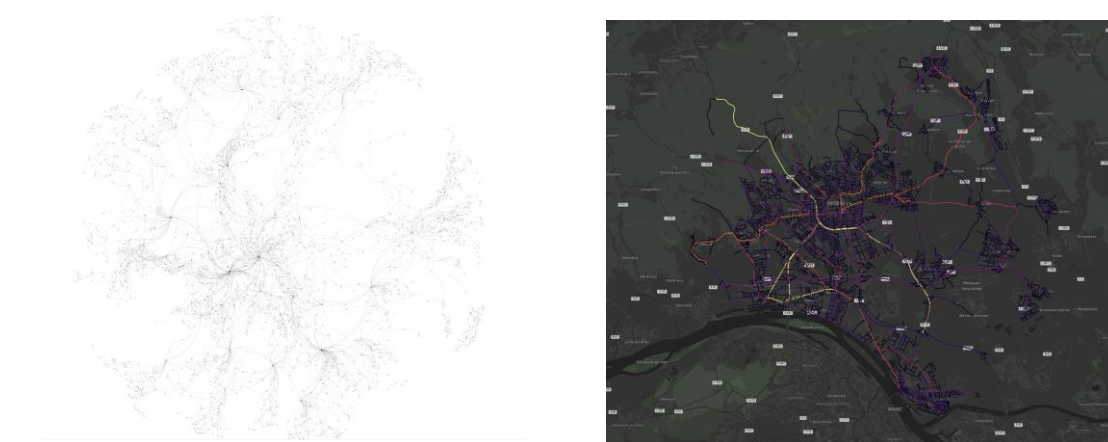


Abbildung 4: Der duale Graph der Stadt Wiesbaden. Links die reguläre Repräsentation eines Graphen. Rechts die Darstellung innerhalb der primalen Graphen. Die Knoten des dualen Graphen sind rechts nach ihrem Knotengrad koloriert.⁵

Eigenschaften von komplexen Netzen

Es gibt etablierte Kennwerte, die für die Beschreibung und den Vergleich von Graphen herangezogen werden können. Im Rahmen der folgenden Untersuchung sollen vor allem die folgenden Kennwerte untersucht werden:

- Durchschnittliche Pfadlänge (Average Shortest Path Length): Durchschnittliche Länge des kürzesten Pfades zwischen zwei Knoten des Graphen.
- Durchmesser (Diameter): Größte Pfadlänge zwischen zwei Knoten innerhalb eines Graphen.
- Globaler Clusterkoeffizient: Durchschnitt der lokalen Clusterkoeffizienten aller Knoten des Graphen. Der lokale Clusterkoeffizient gibt an, wie sehr die Nachbarn eines Knotens untereinander vermascht sind.
- Knotengrad (Degree): Anzahl der angrenzenden Kanten eines Knotens. Die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Knotengrade werden als Kennwerte betrachtet. Ebenso ist die Gradverteilung sehr aussagekräftig. Unter anderem ist die Gradverteilung für den Nachweis von Skalenfreiheit erforderlich.

Im Rahmen der Untersuchung von Straßennetzen sind diese Kennwerte sehr interessant: Die durchschnittliche Pfadlänge sowie der Durchmesser geben im primalen Graphen dabei beispielsweise an, wie schnell (im Sinne von Länge, Reisezeit oder Anzahl der Kreuzungen) man innerhalb der Stadt reisen kann. Die durchschnittliche Pfadlänge sowie der Durchmesser werden außerdem für die Ermittlung der Robustheit sowie den Nachweis von Small-World-Eigenschaften herangezogen. Die lokalen Clusterkoeffizienten sowie der globale Clusterkoeffizient sind ein häufig in der Literatur angetroffener Kennwert. Im Rahmen der dualen Repräsentation kann er beispielsweise dafür verwendet werden, verschiedene Aufbaustrukturen von Städten zu unterscheiden. So können Jiang et al [7] zum Beispiel anhand eines verallgemeinerten Clusterkoeffizienten unterscheiden, ob eine Stadt nach einem Raster (Grid)-Muster aufgebaut wurde. Der Knotengrad zeigt im dualen Graphen wie die einzelnen Straßen miteinander verbunden sind. Insbesondere, ob die Konnektivität auch in einer Power-Law-Verteilung auftritt.

⁵ Kartenmaterial: [Stadia-Maps](#), © Stadia Maps © OpenMapTiles © OpenStreetMap
Netzwerkgrafik erstellt mit Gephi [6]

Small-World-Eigenschaften

Reale komplexe Netze weisen häufig sogenannte Small-World-Eigenschaften auf. Ein Small-World-Netzwerk zeichnet sich durch einen hohen Clusterkoeffizienten und eine geringe Pfadlänge zwischen zwei beliebigen Knoten im Graphen aus [8], [9]. Diese durchschnittliche Pfadlänge wächst in solchen Netzwerken proportional zur größten Pfadlänge beziehungsweise zum Durchmesser [9].

Für das Straßennetz hätte die Eigenschaft bei der primalen Repräsentation zur Folge, dass trotz steigender Netzgröße (Anzahl an Knoten und Kanten) die Reisewege zwischen zwei Orten relativ kurz blieben. Für den dualen Graph ergäbe die Eigenschaft eine ähnliche Schlussfolgerung. Letztendlich muss man nur selten die Straße beziehungsweise Fahrtrichtung wechseln, um ans Ziel zu kommen. Die Frage, ob es sich beim Straßennetz um ein Small-World-Netzwerk handelt, soll auch in dieser Arbeit erörtert werden. Straßennetze sind (in der primalen Repräsentation) meist in einer Gitterstruktur aufgebaut. Dementsprechend ergibt sich in der Repräsentation meist ein niedriger Clusterkoeffizient. Das spricht eher gegen die Annahme eines Small-World-Netzwerks. Für die duale Repräsentation ergibt sich meist ein deutlich höherer Clusterkoeffizient.

Jiang & Claramunt bejahen die Small-World-Eigenschaft in ihrer Arbeit „Topological analysis of urban street networks“ beispielsweise für die duale Repräsentation der Straßennetze der Städte Gävle, München und San Francisco. Porta et al. erkennen die Small-World-Eigenschaft für einige Städte, jedoch weisen nicht alle untersuchten Städte einen hohen Clusterkoeffizienten in der dualen Repräsentation auf. Dies ist vor allem in nordamerikanischen Städten zu sehen, die eine stark ausgeprägte Gitterstruktur aufweisen [4].

Skalenfreiheit

Skalenfreie Netze sind dadurch charakterisiert, dass die Verteilung des Knotengrades einer Potenzfunktion folgt [10]. Somit gibt es einige wenige Knoten, die sehr stark verbunden sind, während die große Mehrheit nur wenige Kanten besitzt. Dies führt zu einer hohen Resilienz skalenfreier Netze gegenüber zufälligen Knotenausfällen, da die Bedeutung für das Gesamtnetz bei den meisten Knoten sehr begrenzt ist. Gezielte Angriffe gegen hochgradige Knoten haben hingegen weitreichende Auswirkungen.

Für die duale Repräsentation stellen Porta et al. bei hinreichend großen Netzgrößen die Skalenfreiheit fest [4]. Das Ergebnis scheint jedoch auch von der verwendeten Methode der Erstellung des dualen Graphen abzuhängen. So kommen Jiang & Claramunt mit dem „named-street-approach“ nicht zu diesem Ergebnis [7].

Zentralitätsmetriken

Die Zentralitätsmetriken spielen bei Verkehrsnetzen eine zentrale Rolle. Auf eine Vielzahl von Zentralitätsmetriken im primalen Graph gehen Porta et al in ihrer Arbeit „The network analysis of urban streets: a primal approach“ ein. Im Folgenden sollen nur die sogenannte Closeness Centrality („nah bei anderen sein“) sowie die sogenannte Betweenness Centrality („zwischen anderen sein“) untersucht werden[2].

- Closeness centrality: Die closeness centrality drückt die Nähe eines Knoten zu allen anderen im Netz aus. Berechnet wird der Kehrwert der Summe der kürzesten Pfadlänge dieses Knotens zu allen anderen Knoten. Ein Knoten mit hoher closeness centrality hat gegenüber einem Knoten mit niedriger closeness centrality durchschnittlich einen kürzeren Weg zu allen anderen Knoten. Die Knoten mit hoher closeness centrality sind also das „Zentrum“ eines Netzes.

- **Betweenness centrality:** Die betweenness centrality drückt für einen Knoten oder eine Kante aus, wie viele der kürzesten Pfade zwischen zwei anderen Knoten und des Netzes durch ihn oder sie laufen.

Die Closeness centrality kann im primalen Graphen auf besondere Orte hinweisen, von denen aus sich sehr schnell alle anderen Orte besuchen lassen. Noch interessanter ist die betweenness centrality im primalen Graphen: In der Regel können wir davon ausgehen, dass ein Verkehrsteilnehmer den verkehrsgünstigen Weg, bei dem er die geringste Reisezeit zu erwarten ist, zu seinem Ziel verwendet. Nun sind die kürzesten Pfade zwischen den Knoten unter Gewichtung nach Reisezeit annähernd diese verkehrsgünstigsten Wege. Insofern: Geht man nun davon aus, dass es auch tatsächlich Fahrten zwischen Knoten gibt, ergeben sich durch die betweenness centrality auch annähernd die Verkehrsauslastung der Knotenpunkte beziehungsweise der Kanten [11]. Es handelt sich insofern aber auch nur um eine Annäherung, da bei der Berechnung der betweenness centrality jeder Knoten und damit jedes Reiseziel als gleichbedeutend angenommen wird. Die betweenness centrality bietet damit dennoch einen Anhaltspunkt über die Wichtigkeit von Straßen und Straßenabschnitten im Verkehrsnetz.

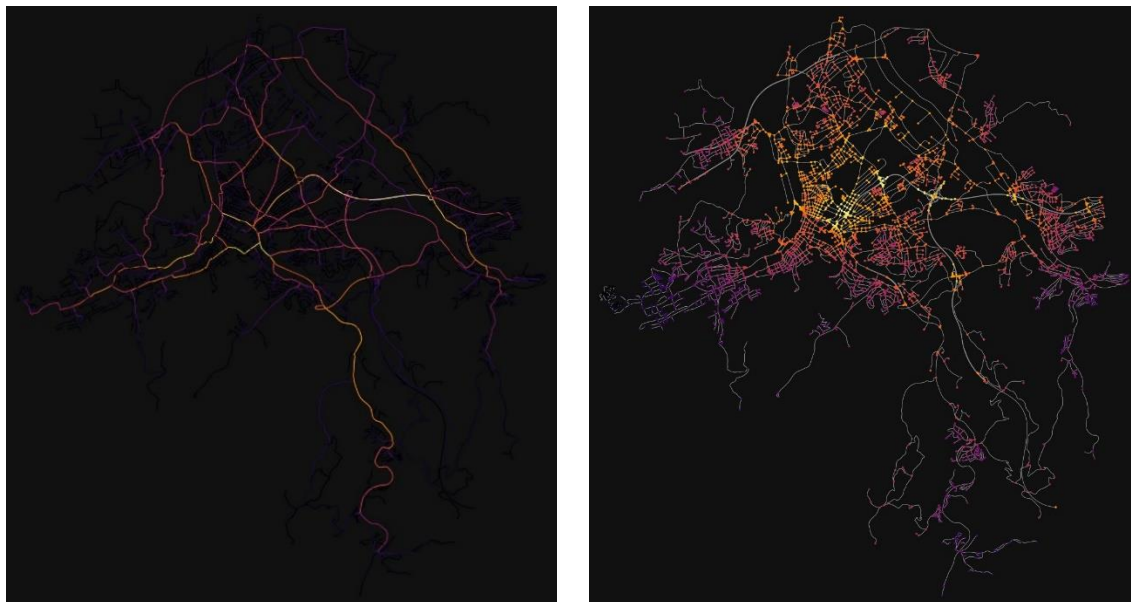


Abbildung 5: Border-Effekt dargestellt am Beispiel der Stadt Hagen; links: Kanten sind nach Betweenness-Zentralität eingefärbt, hohe Werte sind heller. Der Border-Effekt lässt Straßenteile am Rand dunkler erscheinen obwohl die Wege für den überörtlichen Verkehr relevant bleiben. Rechts: Closeness-Zentralität der Kanten. Die starke Abhängigkeit vom gewählten Ausschnitt wird deutlich.

Beide Zentralitätsmetriken unterliegen jedoch dem sogenannten Border Effect (Randeffekt), den Porta et al. [2] genauer untersucht haben. In der Regel (so auch in Abbildung 5) wird immer nur ein kleiner Ausschnitt des Straßennetzes betrachtet. Das führt dazu, dass zentral gelegene Knoten dieses Ausschnitts schon allein durch die Wahl des Ausschnitts höhere Zentralitätswerte haben. Knoten und Kanten an den Rändern des Ausschnitts erhalten niedrigere Werte, obwohl sie im Straßennetz trotzdem von hoher Bedeutung sind. Zur Begegnung dieses Problems kann ein größerer Ausschnitt gewählt werden. Bei Betrachtung einer Stadt könnten z.B. Vororte eingebunden werden. Auch die duale Repräsentation kann nach Porta et al. [4] statt der betweenness centrality im primalen Graphen zum Finden von wichtigen Straßen herangezogen werden. Der Border Effect ist im dualen Graphen nur eingeschränkt wirksam, da jeweils der gesamte Straßenverlauf betrachtet wird und der geografische Ort der Straßenteile nur noch eingeschränkten Einfluss hat.

Robustheitsanalyse

Die Robustheitsanalyse eines komplexen Netzes kann dadurch erfolgen, dass in einem Netz Knoten oder Kanten zufällig oder strategisch entfernt werden [12], [13], [14]. Beim zufälligen Entfernen hat jeder Knoten beziehungsweise jede Kante die gleiche Wahrscheinlichkeit entfernt zu werden. Beim strategischen Entfernen wird die zu entfernende Kante oder Knoten systematisch, zum Beispiel anhand des Knotengrads oder der Zentralitätsmetriken gewählt [13], [15]. Während des sukzessiven Entfernens wird die Auswirkung auf das Netz analysiert.

Dafür ist beispielsweise als Kennwerte die Anzahl der vorgenommen Knoten- beziehungsweise Kantenentfernungen relevant bis der Graph nicht mehr zusammenhängend ist. In diesem Fall wäre also nicht mehr jeder Knoten von jedem anderen Knoten erreichbar [12], [13]. Weitere sehr interessante Kennwerte sind der Durchmesser sowie die durchschnittliche Wegelänge. Betrachtet man den Graphen mit Kantengewichten, zum Beispiel wie hier, mit der Reisezeit oder der geografischen Länge. Dann kann man die Auswirkungen der Veränderungen auf die Reisezeit oder Reiseweg feststellen. Ein robusteres Netzwerk kann gegenüber einem weniger robusten Netzwerken mehr Entfernungen von Knoten beziehungsweise Kanten aushalten und das Entfernen hat einen geringeren Einfluss auf den Durchmesser und die durchschnittliche Wegelänge [14].

Methodik

Die Eigenschaften der Straßennetze von deutschen Städten und Gemeinden sollen im Folgenden analysiert werden.

Ableiten des primalen Graph aus OSM-Daten

Als Grundbaustein basiert die Analyse auf den Daten der offenen OpenStreetMap-Datenbank⁶. Bei OpenStreetMap handelt es sich um eine freie Datenbank von Kartendaten, die kollaborativ erweitert und gepflegt wird. Die OSM-Datenbank hält den Straßenverlauf und die Kreuzungen zwischen Straßen in Basis-Datenstrukturen wie nodes und ways vor. Die Python-Bibliothek OSMnx [16] ermöglicht es, die OSM-Daten über die bereitgestellte API abzurufen und die Basis-Datenstrukturen des OSM-Projekts in einen Graphen in der Struktur der Python-Bibliothek NetworkX [17] umzuwandeln. In dieser Arbeit wurde die Bibliothek angewiesen, nur öffentliche mit Kfz befahrbare Straßen abzurufen. Die Bibliothek nimmt einige Korrekturen vor, die einen Graphen im graphentheoretischen Sinn herstellen. In den OSM-Datentypen sind nodes und ways beispielsweise nicht gleichbedeutend mit Knoten und Kanten in einem Graphen. Die OSM-Datentypen beinhalten für den Kurvenverlauf z.B. mehrere nodes, die im graphentheoretischen Graphen keinen Sinn machen. Lediglich Kreuzungen und Straßenenden sind für die Analyse als Graph relevant [16]. Die Bibliothek fasst entsprechende nodes zusammen. Lediglich für die graphische Darstellung bleibt der Straßenverlauf als Kanteneigenschaft bestehen. Zusätzlich erzeugt OSMnx aus den OSM-Daten einen gerichteten Graphen, indem ways, die von beiden Seiten befahrbar sind (also keine Einbahnstraßen) zu jeweils eigenen Kanten im Graphen macht. Es entsteht ein gerichteter Graph, der sowohl Selbstschleifen als auch parallele Kanten enthalten kann. Als Kantengewicht enthält der von OSMnx erzeugte Graph die geografische Länge (in Metern) der durch die Kante beschriebenen Straßenabschnitte mittels der in OSM hinterlegten Daten.

Die Kanten werden mittels OSMnx zur weiteren Analyse noch um die geltenden Geschwindigkeitsbeschränkungen, die in OSM hinterlegt sind, erweitert. Im Falle von Autobahnabschnitten mit unbeschränktem Tempo wird die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h

⁶ OpenStreetMap contributors (2017). Verfügbar unter <https://www.openstreetmap.org>.

angenommen. Im Falle von verkehrsberuhigten Straßenabschnitten wird eine Schrittgeschwindigkeit von 10 km/h angenommen. Aus diesen Werten wird dann die voraussichtliche Reisezeit (in Sekunden) dieser Straßenabschnitte berechnet, die sich aus ihrer Länge und der geltenden Geschwindigkeit ergibt. Vereinfachend wird angenommen, dass die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit einer Kante der geltenden Geschwindigkeitsbeschränkung bzw. der Richtgeschwindigkeit entspricht. Zwar ist diese Betrachtung nicht realitätsgetreu; für die Analyse des Straßennetzes ist diese Vereinfachung jedoch sachgemäß; die relativen Proportionen bleiben stimmig. Es ist davon auszugehen, dass die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit bei Fahrten mit dem Kfz in annähernder Weise proportional zur Geschwindigkeitsbeschränkung steigt. Straßenabschnitte mit hohen Geschwindigkeitsbeschränkungen sind meistens auch entsprechend ausgebaut, dass diese Geschwindigkeiten erreicht werden können. Andersherum sind Straßenabschnitte mit niedrigeren Geschwindigkeitsbeschränkungen auch mit verkehrsberuhigenden Maßnahmen ausgestattet, die tatsächlich zu niedrigeren Geschwindigkeiten führen. Die Geschwindigkeitsbeschränkung ist damit auch ein guter Indikator, der angibt, welche Funktion ein Straßenabschnitt im Rahmen des Verkehrsnetzes hat; z.B., ob es sich um eine Hauptverkehrsweg oder um das Nebennetz handelt bzw. auf welcher Hierachiestufe des Straßennetzes die Straßenabschnitte stehen.

Die nachfolgenden Vereinfachungen wurden vorgenommen. Soweit dieser Einfluss auf die Ergebnisse haben wird dieser im Verlauf der Arbeit an der entsprechenden Stelle diskutiert:

- Die Schleifen (self-loops) werden entfernt.
- Parallele Kanten zwischen zwei Knoten werden entfernt. Dabei verbleibt in einem solchen Fall die geografisch kürzeste Kante.
- Die Kantenrichtungen werden entfernt: Gerichtete Kanten werden zu ungerichteten Kanten. Bei beidseitig befahrbaren Straßenabschnitten werden die entgegengesetzten Kanten zu einer ungerichteten Kante zusammengefasst. Die geografische Länge und die geschätzte Reisezeit ist bei diesen Kanten ohnehin gleich. Sie entstanden ursprünglich aus den gleichen OSM-Datenstrukturen.

Ableiten des dualen Graphen aus dem primalen Graphen

In dieser Arbeit soll der duale Graph der Straßennetze analysiert werden. Dieser wird hier aus dem primalen - durch OSMnx erzeugten und vereinfachten - Graphen abgeleitet. Dabei wird der auf der Kontinuität von Straßenverläufen basierende Ansatz von Massuci et al. HICN (Hierarchical Intersection Continuity Negotiation) verwendet [5]. Dieser baut auf dem ICN (Intersection Continuity Negotiation) von Porta et al. [4] auf. Letztendlich wird beim ICN jeder Knoten durchgegangen. Anschließend werden die Kantenpaare überprüft: Zwei Kanten mit dem jeweils höchsten konvexen Winkel werden als eine zusammenhängende Straße betrachtet. Die sich dann ermittelte Menge von zusammenhängenden Straßen (bestehend jeweils aus einer Menge von Kanten des primalen Graphen) wird jeweils als ein eigener Knoten aufgefasst. Besteht zwischen zwei zusammenhängenden Straßen eine Kreuzung (bzw. ein Knoten im primalen Graphen), wird diese zu einer Kante. Gibt es mehrere Kreuzungen zwischen den gleichen Straßen, also nun parallele Kanten zwischen den Knoten im dualen Graphen, werden diese entfernt. HICN erweitert dieses Verfahren dahingehend, dass die Straßenhierarchie miteinbezogen wird: Zwei Straßenabschnitte bzw. Kanten im primalen Graphen

können dabei nur dann als zusammenhängende Straße betrachtet werden, wenn sie auf der gleichen Hierachiestufe des Straßennetzes stehen.

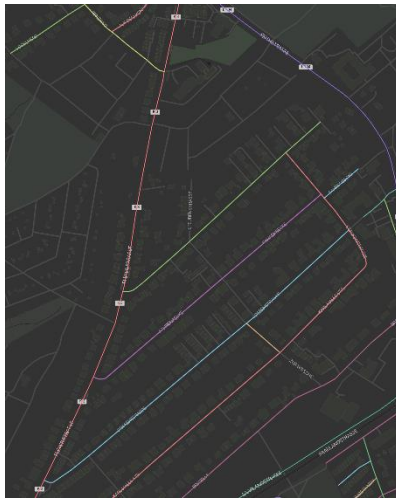


Abbildung 6 (links): Eine Darstellung des dualen Graphen innerhalb eines primalen Graphen. Unterschiedliche Knoten des dualen Graphen sind unterschiedlich koloriert. Kanten werden implizit dadurch dargestellt, dass eine Kreuzung zwischen den Straßenzügen besteht.

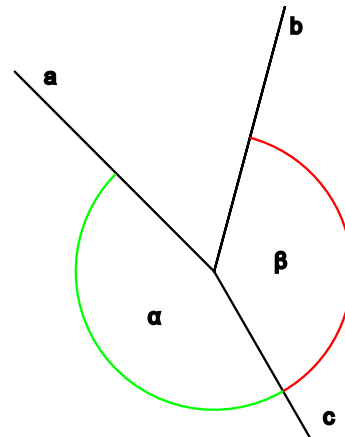


Abbildung 7 (rechts): Zwei Kanten des primalen Graphen werden im dualen Graphen zu einem Knoten zusammengefügt, wenn sie im Straßennetz auf der gleichen Hierarchie sind (z.B. highway="primary") und sie zueinander den höchsten konvexen Winkel haben. Hier werden also die Segmente a und c zu einem Knoten im dualen Graphen.

Im Konkreten wurde auf Basis der Python-Bibliothek StreetContinuity⁷ der HICN-Algorithmus aus den obengenannten Arbeiten implementiert. Die Bibliothek arbeitet dabei auf Grundlage der aus OSMnx abgeleiteten Graphen. Die gleiche Hierarchie der Straßenabschnitte wird dabei von dem verwendeten Algorithmus angenommen, wenn das OSM-Tag highway zwischen beiden Straßenabschnitten übereinstimmt.

Datenbasis für die untersuchten Gemeinden

In dieser Arbeit wurden die Straßennetzwerke zahlreiche deutsche Gemeinden untersucht. Die Daten liegen dabei dem elektronischen Auszug aus dem Gemeindeverzeichnis (GV-ISys) - veröffentlicht durch das statistische Bundesamt - zugrunde.⁸ Dieses wird in regelmäßigen zeitlichen Abständen aktualisiert und online bereitgestellt. Diese Arbeit basiert auf der Monatsausgabe vom 30.11.2023. Nach eigener Angabe führt das Gemeindeverzeichnis jede politisch selbstständige Gemeinde Deutschlands mit verschiedenen Merkmalen auf. Für diese Arbeit sind die Merkmale: Amtlicher Gemeindeschlüssel, Gemeindename, Fläche in km² sowie die Einwohnerzahl von Bedeutung.

In den OSM-Daten werden die Gemeindegrenzen in einer relation-Datenstruktur gespeichert. Eine solche Relation einer Gemeindegrenze beinhaltet eine Menge von ways, welche die Grenzen darstellen und letztendlich ein Polygon des Gemeindegebiets darstellen. Diese Gemeindegrenzen werden genutzt, um das geografische Gebiet einer Gemeinde den Graphen, wie oben dargestellt, abzuleiten. Die Gemeindegrenzen enthalten in Deutschland das Attribut „boundary=administrative“ und den amtlichen Gemeindeschlüssel.⁹ Mithilfe der von OpenStreetMap bereitgestellten OverPass-

⁷ Spadon, G., Scabora, L., StreetContinuity 2019, GitHub repository (<https://github.com/gabrielspadon/StreetContinuity>)

⁸ Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2023, November 30). Gemeindeverzeichnis-Informationssystem GV-ISys. (https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/_inhalt.html)

⁹ <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Tag:boundary%3Dadministrative>

API wurden die entsprechenden Gebietsabfragen gestellt. Sodann wurden diese Gebiete mittels OSMnx analysiert und in die graphentheoretischen Graphen umgewandelt.

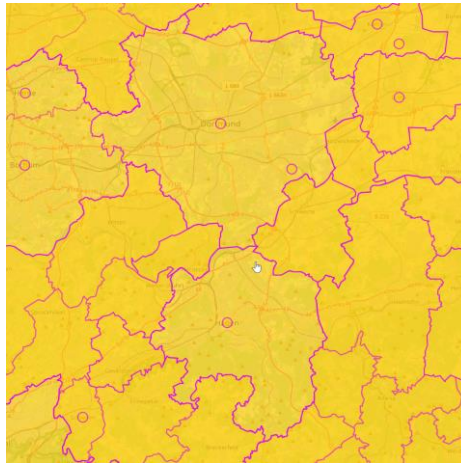


Abbildung 8: Gemeindegrenzen in Hagen, Nordrhein-Westfalen, Deutschland und Umgebung. Abgefragt mit der Overpass-Turbo-Schnittstelle des OSM-Projekts.¹⁰

Bessere Performance durch das Zusammenspiel von graph-tool und NetworkX

In dieser Arbeit werden zahlreiche Graphenoperationen auf einer Vielzahl von Graphen, die teilweise eine Größe von über 20.000 Knoten erreichen, durchgeführt. Insbesondere das Berechnen der Zentralitätseigenschaften des Graphens hat sich als sehr rechenintensiv herausgestellt. NetworkX ist eine auf Python basierende Graphen-Bibliothek. Auch die verwendeten Algorithmen sind in Python geschrieben. Als interpretierte dynamische Sprache hat sich Python für diese Berechnungen als sehr langsam herausgestellt. Für die Berechnungen wurde daher auf die Bibliothek graph-tool [18] zurückgegriffen, welche die rechenintensiven Graphenoperationen an ein in C++ geschriebenes Backend delegiert. Für die Konvertierung der Graphenstrukturen wurde die Bibliothek pyintergraph¹¹ verwendet.

Analyse der Robustheit

Im Rahmen dieser Arbeit soll auch die Robustheit der untersuchten Städtetze analysiert werden. Dabei wird die primale Repräsentation der Verkehrsnetze mit den obengenannten Einschränkungen herangezogen. Der Datenumfang wird dabei aufgrund der intensiven Rechenzeit auf die 98 bevölkerungsreichsten Städte ohne Berlin und Hamburg reduziert.

Die primale Repräsentation ist für die Robustheitsanalyse deutlich geeigneter als der duale Graph. Der Ausfall von Knoten bzw. Kanten ist in der echten Welt tatsächlich möglich und treten auch häufig auf. Kanten (Straßenabschnitte) und Knoten (Kreuzungen) können zum Beispiel aufgrund von Baustellen, Streiks oder Staus ausfallen. Der Ausfall kann dann zu Verzögerungen und deutlichen Umwegen für alle Verkehrsteilnehmer führen. Der Ausfall von Knoten und Kanten des dualen Graphens ist in der realen Welt eher weniger häufig, da die ganze Straße, die durch den Knoten abgebildet wird, davon betroffen sein müsste. Dies könnte zum Beispiel bei Naturkatastrophen der Fall sein.

¹⁰ OpenStreetMap contributors (2017). Verfügbar unter <https://overpass-turbo.eu/>.

¹¹ Erhard, L., pyintergraph, GitHub repository (<https://github.com/luerhard/pyintergraph>)

Modelliert wird im Folgenden der Ausfall von Kanten: In der realen Welt können hinter einem solchen Ausfall beispielsweise Baustellen, Protestaktionen, Brückenschäden und Staus stehen. Der Ausfall einer Kante scheint deutlich häufiger in der realen Welt als der Ausfall einer Kreuzung. Für jede der analysierten Städte werden die Kanten entweder zufällig oder strategisch entfernt. Nach jedem Entfernen einer Kante wird der daraus resultierende Graph darauf überprüft, ob der Graph in mehrere Komponenten zerfällt. Außerdem werden der resultierende Durchmesser und die durchschnittliche Pfadlänge festgehalten. Insgesamt wurden für jede Stadt 0,6 % aller Kanten entfernt. Der Wert ergibt sich aufgrund des sehr rechenintensiven strategischen Entfernens der Kanten.

Das strategische Entfernen wurde mit vier Strategien durchgeführt. Es wurde jeweils mit der Zentralitätsmetrik der “betweenness centrality” gearbeitet. Dabei wurde die Zentralität mit Berücksichtigung der Reisezeit als Kantengewicht und ohne Kantengewicht betrachtet. Diese beiden Strategien wurden dann noch mal darin unterteilt, ob die Zentralitätsmetrik nach jedem Entfernen erneut berechnet wurde oder nicht.

Tabelle 1: Ansätze für die strategische Kantenentfernung

	Ohne Kantengewicht	Gewichtung nach Reisezeit
Nur initiale Berechnung	betweenness	betweenness_tt
Berechnung nach jedem Schritt	betweenness_with_recomputation	betweenness_with_recomputation_tt

Verfügbarkeit der Ergebnisse

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Skripte und Berechnungen sind auf GitHub unter https://github.com/theodm/seminar_komplexe_netze_street_network verfügbar. Im Rahmen der Entwicklung wurde für zusätzlich eine Webanwendung geschrieben, welche die Untersuchung der Straßennetze in der primalen Repräsentation und der dualen Repräsentation ermöglicht. Auch diese ist im bereitgestellten GitHub-Repository verfügbar.

Ergebnisse

Grundlegende Kennzahlen der Straßennetze

Tabelle 2 bietet einen Überblick über die untersuchten Straßennetze. Im Folgenden werden die Auswertungen der grundlegenden Netzwerk-Eigenschaften für Städte mit mindestens 50.000 Einwohnern für jeweils den primalen und den dualen Graphen vorgestellt.

Tabelle 2: Grundgesamtheit der ausgewerteten Straßennetze

Einwohner	Anzahl Städte & Gemeinden	Mittlere Stadtfläche [km²]	mittlere Anzahl Knoten (primal)	mittlere Anzahl Kanten (primal)	mittlere Anzahl Knoten (dual)	mittlere Anzahl Kanten (dual)
über 500 k	14	3,438.13	12,040.43	16,894.29	5,216.29	9,943.64
100 k - 500 k	65	1,299.08	3,628.72	4,820.68	1,649.31	2,779.77
50 k - 100 k	111	907.38	1,865.47	2,401.50	866.11	1,364.14
unter 50 k	9591	334.24	238.95	297.19	131.61	195.60

Abbildung 9 zeigt die Durchmesser der Straßennetze bei Betrachtung ohne und mit Kantengewichten im Verhältnis zu den Flächen der jeweiligen Gemeindegebieten. Im primalen Graph ist ein Zusammenhang zwischen zunehmender Ausdehnung eines Stadtgebiets und dem Durchmesser festzustellen. Im dualen Graph besteht dieser Zusammenhang nicht mehr, wie an den beiden größten Straßennetzen (Berlin und Hamburg) zu erkennen ist: Dort liegen diese Netze trotz ihrer physischen Ausdehnung im Mittelfeld der Großstädte, was auf das Vorhandensein von Hauptverkehrsachsen hindeutet, die eine direkte Verbindung über weite Bereiche der Stadt ermöglichen.

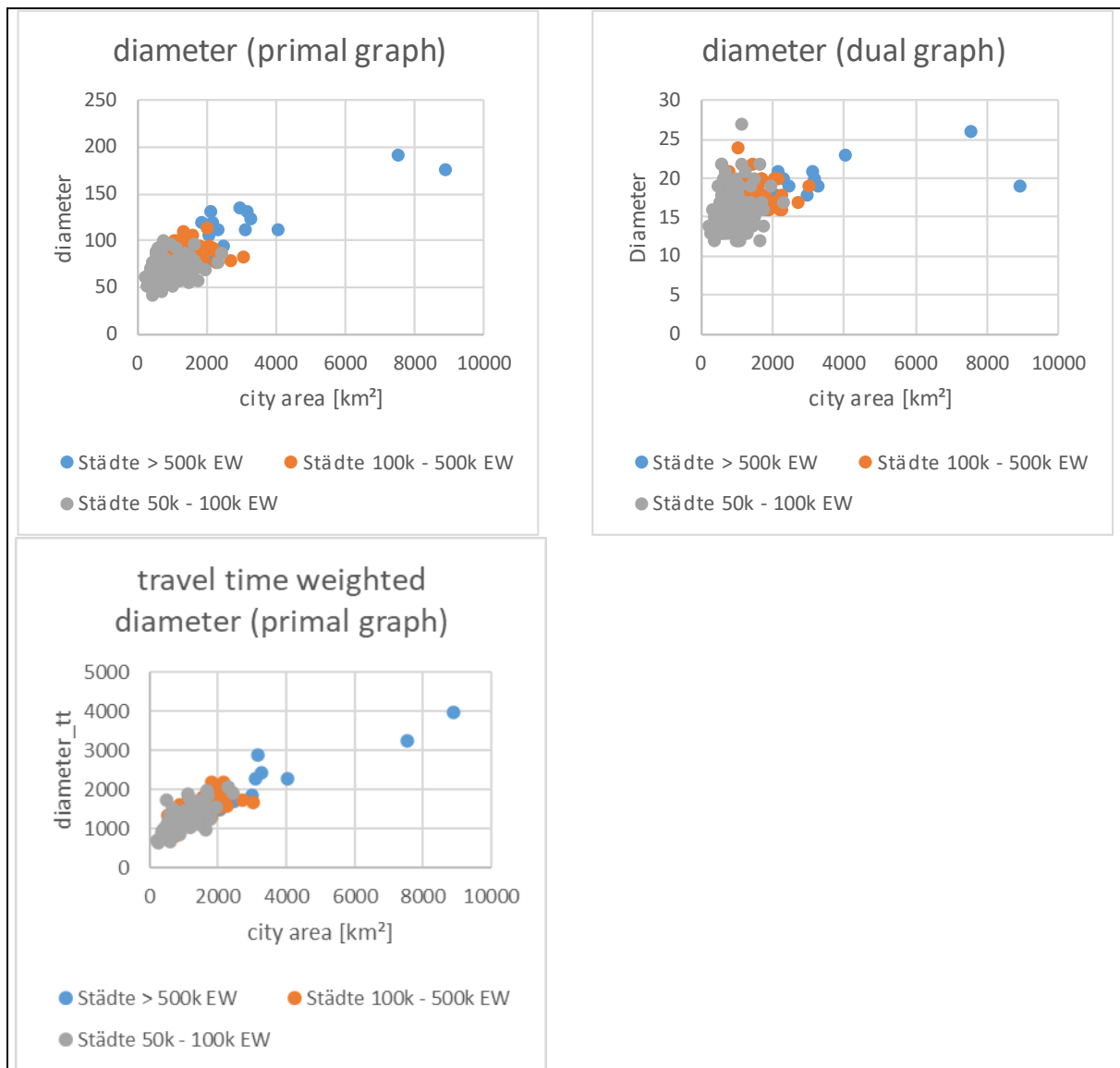


Abbildung 9: Netzdurchmesser im Verhältnis zur Stadtfläche

Small-World-Eigenschaften

Sogenannte Small-World-Netzwerke zeichnen sich durch verschiedene Eigenschaften aus. Um das Vorliegen von Small-World-Eigenschaften nachzuweisen, werden die durchschnittliche Pfadlänge und der Clusterkoeffizient herangezogen.

In Abbildung 10 sind die durchschnittlichen Pfadlängen dargestellt. Beim primalen Graphen ist bei wachsender Netzgröße auch ein Zuwachs der mittleren Pfadlänge festzustellen. Beim dualen Graphen ist der Anstieg geringer ausgeprägt. Auch in den größten Straßennetzen bewegen sich die Pfadlängen annähernd im selben Wertebereich, wie bei Netzen mit deutlich weniger Knoten. In beiden Modellen werden geringe Pfadlängen im Verhältnis zur Knotenzahl beobachtet.

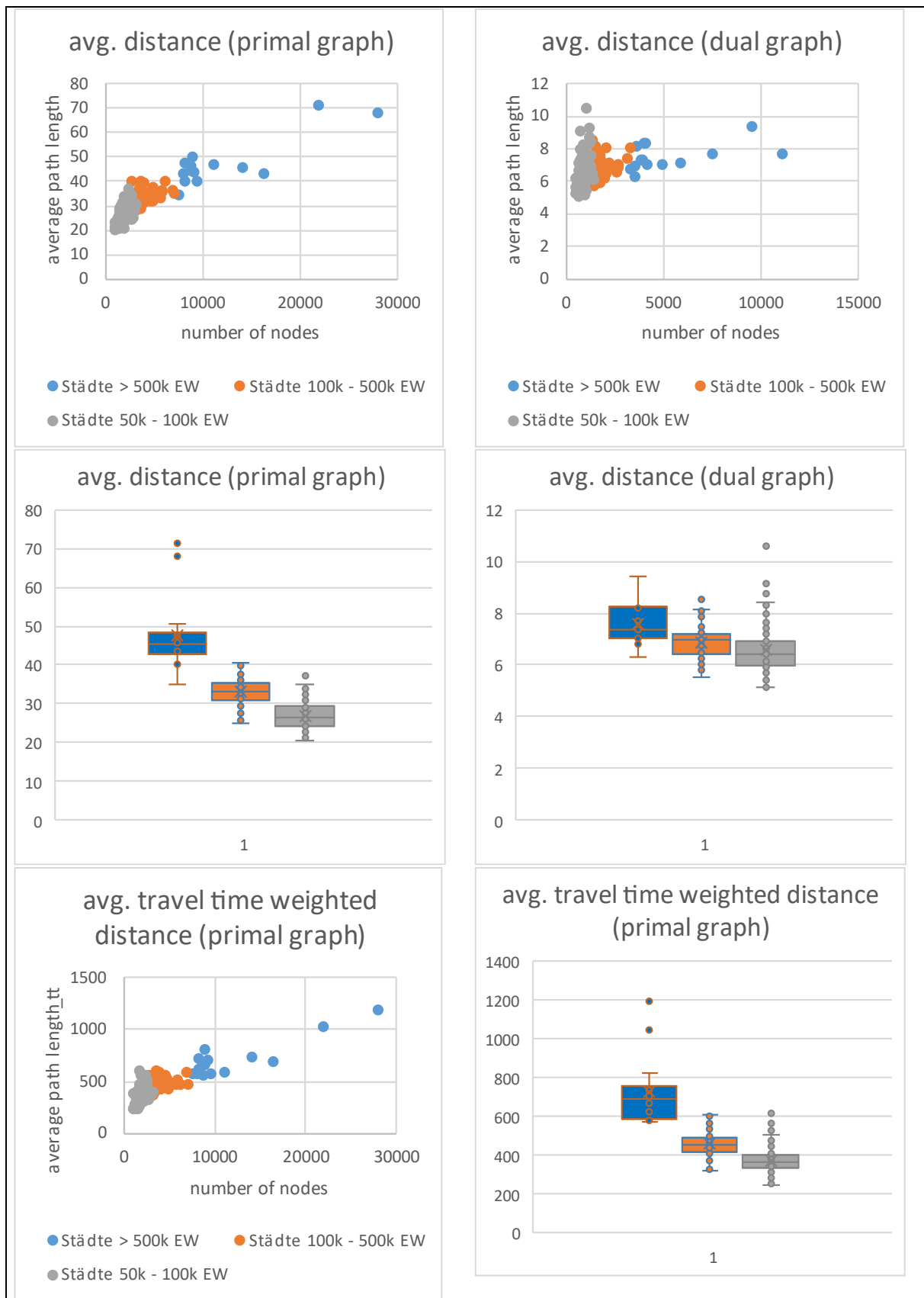


Abbildung 10: Durchschnittliche Pfadlängen

Abbildung 11 zeigt die ermittelten Clustering-Koeffizienten. Die Ergebnisse des primalen Graphen liegen in dem von der Literatur beschriebenen Rahmen für Straßennetze [19]. Bei den dualen

Graphen sind Werte festzustellen, die zwischen 0.15 und 0.35 liegen und somit im Durchschnitt rund um den Faktor 4 höher liegen. Der Clusterkoeffizient kann daher als "hoch" angesehen werden.

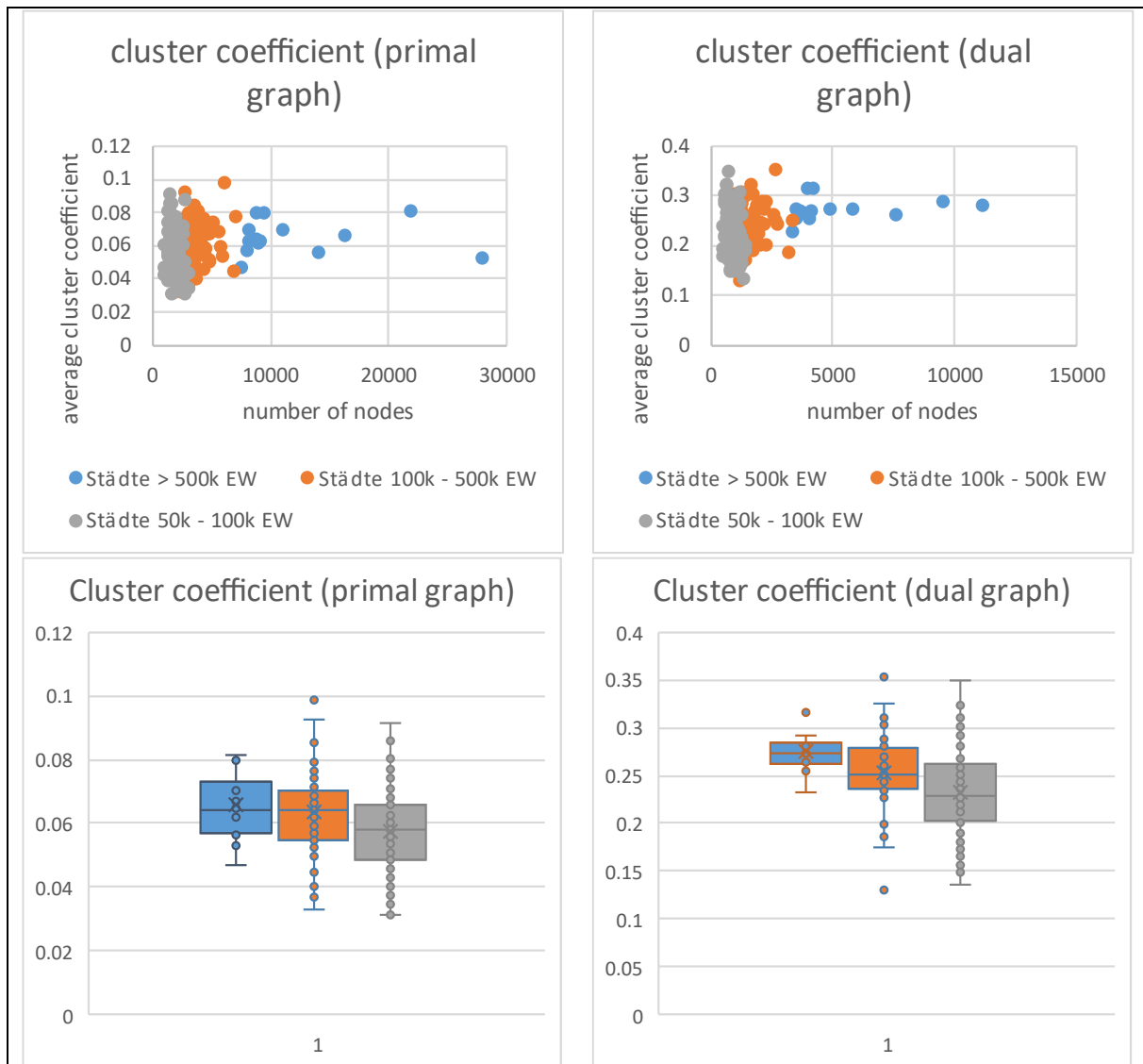


Abbildung 11: Clustering-Koeffizient

Betrachtet man die Verteilung der lokalen Clusterkoeffizienten, dann sind diese vor allem innerhalb der Städte tendenziell in den Seitenstraßen höher. Verbindungsstraßen zwischen Orten und Hauptstraßen innerhalb der Orte haben einen tendenziell niedrigeren lokalen Clusterkoeffizienten (s. Abbildung 12).

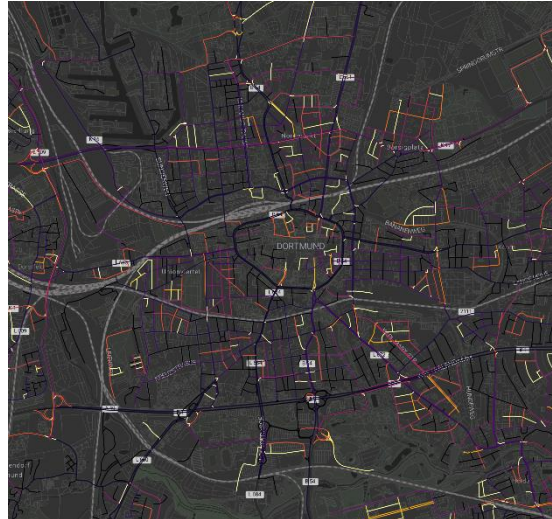


Abbildung 12: Beispiel für die Verteilung der lokalen Clustering-Koeffizienten (höhere Werte sind mit helleren Farben dargestellt)

Skalenfreiheit

Die Gradverteilung ist ausschlaggebend für die mögliche Skalenfreiheit eines Netzes. Abbildung 13 veranschaulicht die Ergebnisse anhand von ausgewählten Beispielen.

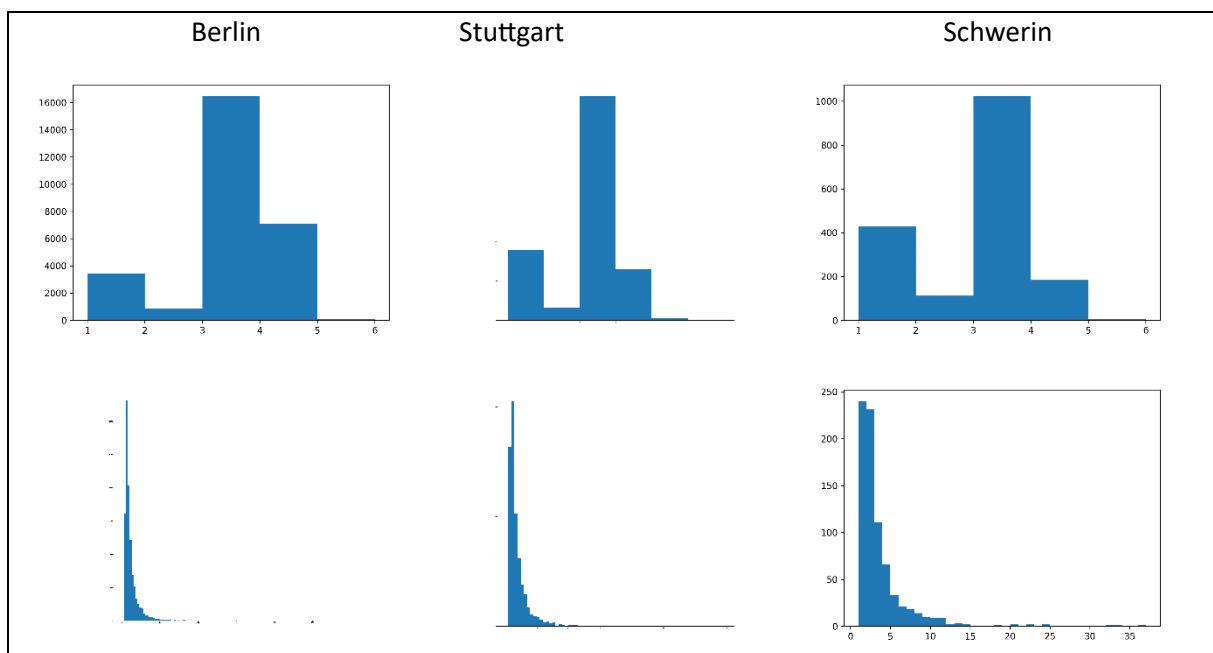


Abbildung 13: Knotengradverteilung der primalen Graphen (oben) und der dualen Graphen (unten) ausgewählter Städte.

Bei den primalen Graphen liegt keine erkennbare Potenzfunktion und somit keine Skalenfreiheit vor. Die Knotengrade bewegen sich durchweg im einstelligen Bereich mit einem Maximum bei 7. Dies entspricht der Erwartung, da bei Kreuzungen aus räumlichen Gründen eine begrenzte Anzahl Straßen aufeinandertreffen. T-Kreuzungen (drei angrenzende Straßen) treten häufig auf. Bei zwei aufeinandertreffenden Straßen liegt per Definition keine Kreuzung vor. Knoten mit Knotengrad zwei treten nur aus modelltechnischen Gründen auf, wenn sich Attribute der Straße ändern. Endknoten mit einer Kante gehen auf Sackgassen zurück oder befinden sich am Rand des Untersuchungsgebiets und gehen auf den border effect zurück. Kreuzungen mit sechs oder mehr Einmündungen bilden Sonderfälle dar und wurden in den Daten erwartungsgemäß kaum vorgefunden.

Bei den dualen Graphen stellen sich andersartige Ergebnisse dar. Bei allen Netzen ist maßstabsunabhängig im geringen Gradbereich zunächst ein steiler Anstieg der Knotenzahl auf das Maximum festzustellen. Mit zunehmendem Knotengrad folgt dann ein Abfall, der näherungsweise einer Potenzfunktion entspricht. Dabei gibt es einige wenige Knoten, die sehr hohe Grade aufweisen. Dies ist in Anbetracht der Aufbau einer Stadt leicht ersichtlich. Wir haben wenige, dafür aber lange, Hauptverkehrsstraßen und Autobahnen, die ein schnelles Fortbewegen sicherstellen sollen. Daneben gibt es ein Nebennetz an Straßen, die meist bereits ein Ziel darstellen. Zum Beispiel Wohngebiete, Industriegebiete oder zentrale Straßen einer Innenstadt. Aus der Knotengradverteilung lässt sich damit annähernd die Hierarchie des Verkehrsnetzes in absteigenden Kategorien von Straßentypen nach Bedeutung für den fließenden Verkehr wiedererkennen.

Somit erfüllen die dualen Graphen das Kriterium für eine vorliegende Skalenfreiheit.

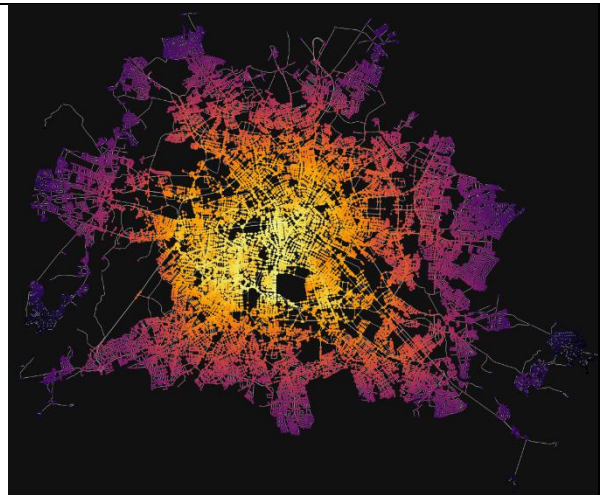
Zentralitätsmaße

In Abbildung 14 sind Auswertungen zur Closeness-Zentralität am Beispiel des Berliner Straßennetzes dargestellt. Hierbei treten diejenigen Teile des Netzes hervor, die im Durchschnitt die geringsten Pfadlängen zu allen anderen Knoten des Netzes aufweisen. Beim primalen Graphen tritt der Berliner Stadtring (A 100) klar hervor. Dies liegt bei dieser Betrachtung vor allem daran, dass eine Autobahn üblicherweise weniger Knotenpunkte als Eingänge- und Ausgängen und schon gar keine Kreuzungen hat. Ein interessanteres Bild ergibt sich, wenn man die benötigte Reisezeit oder die geografische Länge der Wege berücksichtigt. Hier zeigt sich, um welches Zentrum der Stadt sich die Verkehrsnetze bilden. Insbesondere zeigt sich deutlich, dass das Zentrum auch von allen Randgebieten in ähnlicher Zeit erreichen lässt. Das lässt den Schluss zu, dass die Verkehrswege so beschaffen sind, dass sie von überall aus eine gute Erreichbarkeit zum Zentrum gewährleisten.

Beim dualen Graphen ist zu beobachten, dass Hauptstraßen im ganzen Stadtgebiet hervortreten und Nebenstraßen niedrigere Werte erhalten, auch wenn sie sich in zentraler Lage befinden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier die ganzen Straßen einen Knoten darstellen. Die Grafik zeigt also wie viele Straßen von einer Straße zu einer anderen gewechselt werden müssen, um diese zu erreichen. Konkret sehen wir also, dass die Hauptverkehrsstraßen sehr gut miteinander verbunden sind.



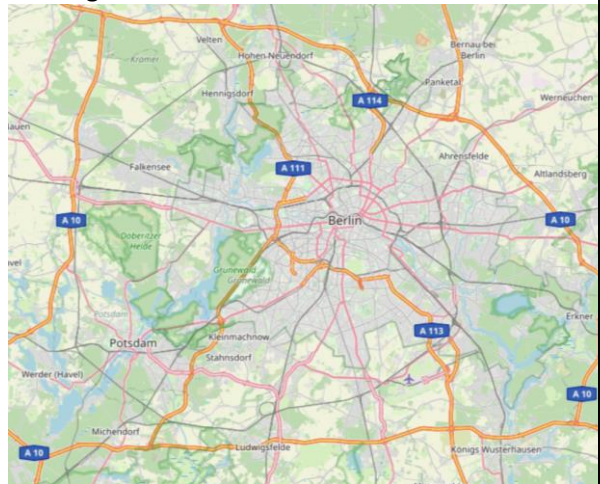
closeness centrality (primary graph)



c.c. (primary graph) unter Berücksichtigung der benötigten Reisezeit



closeness centrality (dual graph)



OpenStreetMap-Kartenauszug

Abbildung 14: Closeness-Zentralität am Beispiel Berlin

Als weiteres Zentralitätsmerkmal wurde die Betweenness-Zentralität berechnet. Diese wird auch im Rahmen der Robustheit-Auswertung für die Ermittlung kritischer Kanten herangezogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 dargestellt.

Im primalen Graphen haben vor allem Ring- und Ausfallstraßen einen hohen Wert und sind gut erkennbar, da diese den Verkehr über Stadtviertel hinweg bündeln und entsprechend Bestandteil vieler kürzester Pfade sind. Wird die Reisezeit beziehungsweise die geografische Länge bei der Ermittlung der kürzesten Pfade eingerechnet, ist eine Verlagerung auf andere Routen und weg von der Stadtmitte erkennbar. Gerade bei der Betrachtung der Reisezeit werden solche Routen sichtbar, die gewöhnlicherweise eine hohe Geschwindigkeit und damit schnelles Vorankommen möglich machen (z.B. Autobahnen). Über solche Strecken ergibt sich dann trotz geografisch längeren Wegs und auch größerer Anzahl an Knotensprüngen eine kürzere Reisezeit. Auch das ist insofern erwartbar, als dass einige Straßen genau dafür vorgesehen sind, schnell voranzukommen. Andere wiederum verkehrsberuhigt sind, um übermäßigen Verkehr zu vermeiden.

Beim dualen Graphen lässt sich die Hierarchie und die Hauptverkehrsachsen wieder deutlich erkennen. Hier bestätigt sich auch die Erkenntnis von Porta et al. [4], dass der sogenannte "Border-

Effekt“ beim dualen Graphen nur noch eine kleinere Rolle spielt. Auch Hauptverkehrsstraßen an den Grenzen des Kartenausschnitts werden noch deutlich hervorgehoben.

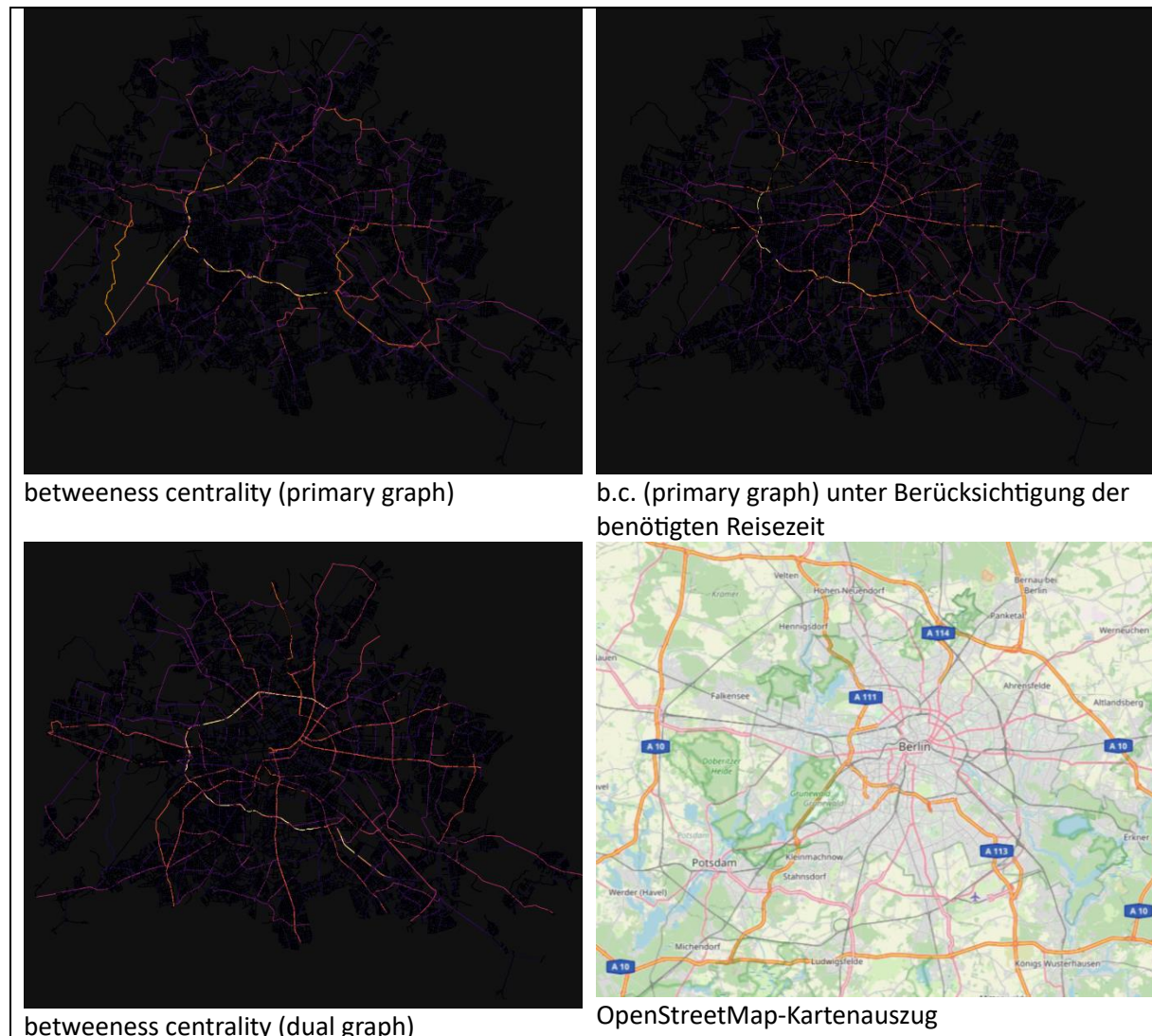


Abbildung 15: Betweenness-Zentralität am Beispiel Berlin

Robustheit

Im Rahmen der Robustheitsanalyse haben sich schnell gezeigt, dass das zufällige Entfernen von Kanten kaum einen Einfluss auf die durchschnittliche Pfadlänge und den Durchmesser mit und ohne Gewichtung nach Reisezeit hat. Die durchschnittliche Pfadlänge hat sich nach Entfernen der 0.6 % der Kanten um lediglich 0,9 (0,8 % bei Reisezeit) gegenüber dem Initialwert erhöht. In 91 Städten hatte das Netz nach Entfernen von 0.6 % der Kanten mehrere Komponenten, wobei die kleineren Komponenten in den meisten Fällen nur einen Knoten groß waren. In 22 Fällen war die kleine Komponente etwas größer. Die größte so entstandene kleinere Komponente hatte 24 Knoten. In der realen Welt war es also nicht möglich, einen besonders großen Teil der Stadt durch zufälliges Entfernen der Kanten vom Straßennetz abzuschneiden. Vielmehr konnten nur sehr kleine Gebiete vornehmlich Sackgassen abzuschneiden.

Im Rahmen der Betrachtung der anderen Strategien ist die Angabe der prozentualen Veränderung nicht mehr so einfach. Wenn das Entfernen einer Kante das Entstehen einer eigenen Komponente zur Folge hat, dann kann die durchschnittliche Pfadlänge und der Durchmesser nur noch für die größte Komponente berechnet werden und sinkt damit sogar. Letztendlich dauert es gegenüber dem

zufälligen Entfernen deutlich länger, bis das Netz in mehrere Komponenten zerfällt. Wenn es das jedoch tut, entsteht auch deutlich größere kleinere Komponenten. Das bedeutet also ein großer Teil der Stadt ist vom anderen Teil der Stadt abgeschnitten. In Tabelle 3 ist das Ergebnis der verschiedenen Strategien für die Stadt Frankfurt am Main (Hessen) zu sehen.

Tabelle 3: Ergebnisse verschiedener Strategien zur Robustheitsermittlung am Beispiel der Stadt Frankfurt a.M.

Strategie	Schritte bis 2 Komponenten	Anzahl Knoten der kleineren Komponente	Größe der kleineren Komponente im Verhältnis zum Gesamtnetz	Ø Pfadlänge (vorher)	Ø Pfadlänge (bei Entstehung zweiter Komponente)	Ø Reisezeit vorher (in s)	Ø Reisezeit (bei Entstehung zweiter Komponente)
random	1	1	0.0106 %	40.24	40.24	604.46	604.46
betweenness	25	1	0.0106 %	40.24	45.41	604.46	623.12
betweenness_with_recomputation	26	1716	18,1051 %	40.24	65.66	604.46	787.16
betweenness_tt	3	2	0.0211 %	40.24	40.77	604.46	608.90
betweenness_with_recomputation_tt	46	2823	29,7848	40.24	65.53	604.36	896.80

Die Tabelle zeigt die verschiedenen Strategien im Vergleich. Es wird angegeben, wie viele Schritte die verschiedenen Strategien benötigt haben, um das Netz in zwei Komponenten zu zerlegen sowie die Größe der resultierenden kleineren Komponente. Hier zeigt sich schnell, dass das Neuberechnen der Betweenness-Zentralität deutlich effektiver ist, um eine Netzteilung zu erreichen. Das war insofern auch erwartbar, als dass nur bei dieser Strategie die vom jeweils vorherigen Schritt erzeugte Veränderung der Netzstruktur berücksichtigt wurde. Im anderen Fall ohne Neuberechnung gibt es bei der Betweenness-Zentralität meist mehrere direkt aneinander liegende Kanten mit hoher Betweenness-Zentralität, da die meisten kürzesten Wege nicht nur durch eine Kante, sondern meist auch durch die benachbarten Kanten verlaufen. Diese Kanten müssen erst entfernt werden, bevor die Strategie zu "vielversprechenderen" Kanten gehen kann. Insofern sollen im Folgenden die Strategien mit Neuberechnung im Fokus stehen. Wie aus der Tabelle ersichtbar, sind sie auch hinsichtlich der Vergrößerung der durchschnittlichen Pfadlängen gegenüber den anderen Strategien sehr effektiv und bewirken auch bei ähnlicher Schrittzahl eine deutliche Erhöhung der durchschnittlichen Pfadlänge ohne und auch mit Berücksichtigung der Reisezeit. Auch das überrascht nicht, wir entfernen gerade die Kanten, durch welche die meisten kürzesten Wege des Graphen gehen. Gerade diese Kanten sind also vielversprechend für Angriffe. Abbildung 16 zeigt, wie sich die durchschnittliche Pfadlänge bei den verschiedenen Strategien über die verschiedenen Schritte verhält. Man sieht an den plötzlichen Veränderungen der Pfadlänge der größten Komponente gut, wann der Graph sich wieder in mehrere Komponenten teilt.

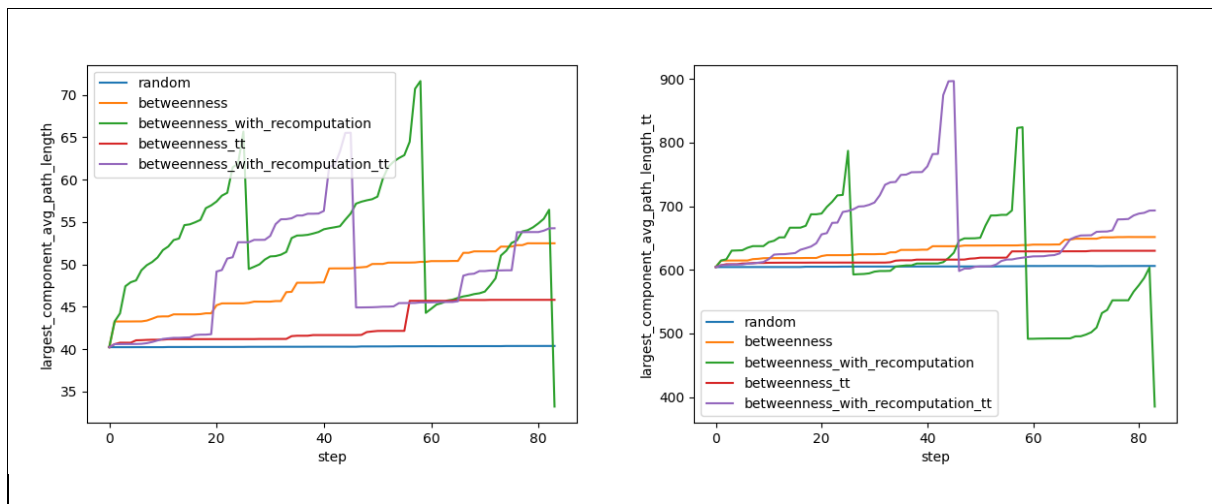


Abbildung 16: Links: Entwicklung der durchschnittlichen Pfadlänge der in dem Schritt größten Komponente der Stadt Frankfurt am Main mit zunehmender Anzahl entfernter Kanten (X-Achse) bei Anwendung der unterschiedlichen Kantenentfernungsstrategien. Rechts: Mit Gewichtung der Pfadlänge nach der Reisezeit

Der in Abbildung 17 gezeigte Städtevergleich zeigt, wie viele Kanten als Prozent der Gesamtzahl entfernt wurden, um die Stadt in mehrere Komponenten zu unterteilen. Dabei wurden die Städte mit einer sehr hohen Einwohnerzahl explizit markiert und mit der Größe der entstehenden kleineren Komponente in Anzahl Knoten versehen.

Städte, bei denen es erst recht spät zu einer Aufteilung in mehrere Komponenten kommt und solche bei denen es recht früh dazu kommt, unterscheiden sich wie folgt: Städte wie Köln, Duisburg, Bremen und Leipzig mit einem niedrigen Wert haben einen Fluss, der durch das Stadtgebiet fließt und große Teile der Stadt voneinander trennt. Dort zwischen gibt es nur wenige Überquerungen, welche die Stadteile verbinden. In Städten wie Hannover, Dortmund und Essen gibt es keine vergleichbaren Hindernisse. Entsprechend dauert es länger, bis das Stadtgebiet nicht mehr verbunden ist. Eine Ausnahme ist die Stadt Düsseldorf; hier gibt es einen Fluss. Jedoch grenzt er nur einen kleinen Teil des Stadtgebiets (18,07 %) ab. Insofern priorisiert die Entfernungsstrategie diese Überquerungen nicht, da sie nur einen kleinen Einfluss auf die durchschnittliche Pfadlänge haben. Die Betrachtungen scheinen also (insbesondere in diesem Fall) vom Border-Effect beeinflusst zu werden. Die Ergebnisse lassen insofern den Schluss zu, dass es in Städten ein sehr dichtes Straßennetz gibt, welches gegenüber Ausfällen gut gewappnet ist. Das könnten beispielsweise Umleitungen durch Nebenstraßen sein. Andererseits gibt es zwischen Ortschaften und in diesem Fall Brücken, Verbindungen, die sehr kritisch sind, um Ortsteile miteinander zu verbinden.

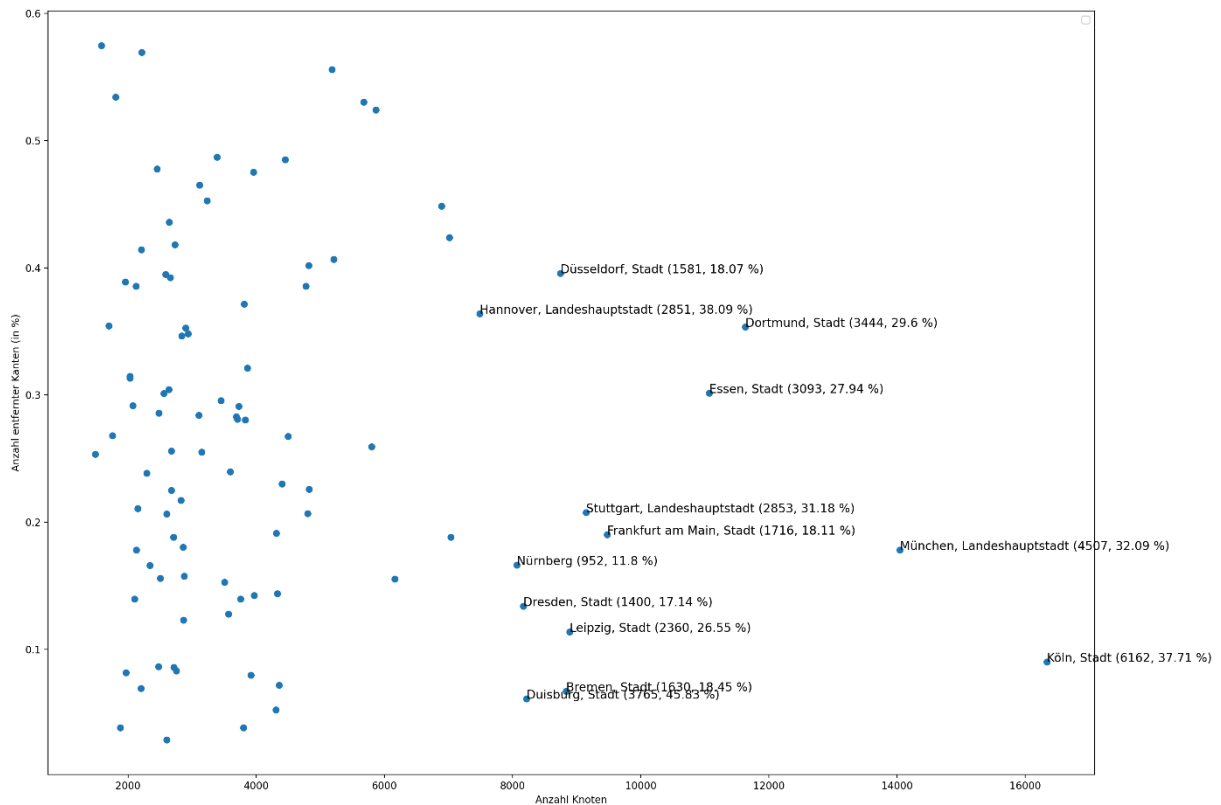


Abbildung 17: Die Abbildung zeigt für die untersuchten Städte die Anzahl an entfernten Knoten in %, die nötig waren, um das Netz in zwei Komponenten zu zerlegen. Die Städte sind dabei auf der X-Achse nach der Anzahl der Knoten der Straßennetze sortiert.

Diskussion

Small-World-Eigenschaften

Zu klären ist, ob auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse Small-World Eigenschaften festgestellt werden können und wie stark diese ausgeprägt sind.

Das Kriterium der kurzen Pfadlänge zwischen zwei beliebigen Knoten des Netzwerks kann man bei der primalen Repräsentation nur eingeschränkt als erfüllt ansehen. Diese Graphen haben schon eine hohe durchschnittliche Pfadlänge von bis zu 80 Knotenbesuchen. Bei der dualen Repräsentation kann man die Eigenschaft jedoch eindeutig annehmen. Bei dieser Repräsentation der Städte liegt die durchschnittliche Pfadlänge zwischen vier und 13 Knotenbesuchen. Durch den Vergleich von einer Vielzahl von deutschen Gemeinden untereinander kann man sehr schön erkennen, dass bei steigender Knotenanzahl beim primalen Graphen dieser Wert im Verhältnis zur Knotenanzahl das Wachstum gering ist. Beim dualen Graph ist diese Eigenschaft noch ausgeprägter, da dort kein Zuwachs der Pfadlänge mit zunehmender Netzgröße innerhalb der untersuchten deutschen Städte zu erkennen war. Dies ist gerade eine Eigenschaft von Small-World-Netzwerken.

Der Clusterkoeffizient des primalen Graphen war gering, was durch die räumliche Natur der Knoten und Kanten bedingt ist. Damit kann der primale Graph nicht als Small-World-Netzwerk angesehen werden. Vielmehr ähnelt der primale Graph einer Gitterstruktur, in der nur die räumlich benachbarten Knoten miteinander verbunden sind.

Bei den dualen Graphen liegen die globalen Clusterkoeffizienten rund um den Faktor 4 höher. Sie sind zwischen allen untersuchten Gemeinden sehr ähnlich. Desto größer die untersuchte Gemeinde ist, desto konsistenter wird diese Beobachtung. Die Eigenschaft des hohen Clusterkoeffizient kann man für den dualen Graphen daher als erfüllt ansehen. Die hohen Clusterkoeffizienten liegen dabei selbst tendenziell nicht auf den Haupt- und (überörtlichen) Verbindungstraßen, sondern auf dem innerstädtischen Nebennetz. Die zentralen Knoten des dualen Graphen sind untereinander also tendenziell weniger miteinander vermascht. Auch hier kann die Ursache einfach in räumlichen Gegebenheiten liegen.

Die Feststellungen, dass die dualen Graphen die Small-World-Eigenschaften aufweisen, die primalen Graphen aber nicht, deckt sich mit den Erkenntnissen von Porta et al. [4].

Skalenfreiheit

Für den primalen Graphen wurde anhand der Verteilung der Knotengrade festgestellt, dass dort keine Skalenfreiheit vorliegt. Aufgrund der räumlichen Begebenheiten sind hohe Knotengrade, also Kreuzungen mit vielen einmündenden Straßen, nicht möglich. Somit können in dieser Repräsentation auch keine „hubs“ vorliegen, also herausgehobene „Zentralknoten“, die viele unterschiedliche Teile des Netzes direkt miteinander verbinden.

Im dualen Graphen stellt sich hingegen ein anderes Bild dar: Die überwiegende Mehrzahl der Knoten besitzen auch hier Verknüpfungen im einstelligen Bereich. Allerdings gibt es auch eine kleine Anzahl Knoten, die im Vergleich sehr hohe Grade aufweist. Im Gegensatz zum primalen ist hier aus den Daten keine natürliche Obergrenze der Knotengrade ersichtlich. Die Knotengradverteilungen weisen die Form einer Potenzfunktion (power law) auf, womit man das formelle Kriterium für die Skalenfreiheit als erfüllt ansehen kann.

Anhand der Knotengradverteilung der dualen Graphen lässt sich die hierarchische Natur der Straßennetze nachvollziehen: Die überwiegende Mehrzahl der Straßen sind Nebenstraßen mit geringer Länge und nur wenigen Kreuzungen. Auf der entgegengesetzten Seite des Spektrums liegen einige wenige Straßen, die über weite Strecken verlaufen und dabei eine sehr hohe Anzahl Verbindungen zu anderen erreichen. Diese besitzen ihrer herausgehobenen Rollen entsprechend meist eine deutlich höhere Verkehrskapazität, die sich an mehr Fahrspuren und höheren Geschwindigkeitsbegrenzungen beobachten lässt.

Robustheit

Die Auswertungen hinsichtlich der Robustheit der Straßennetze ergaben eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen zufällige Kantenausfälle. Bei strategischen Angriffen auf Grundlage hoher Betweenness-Zentralität wurde eine deutlich höhere Anfälligkeit festgestellt. Bei Entfernen einer Kante musste diese stets erneut berechnet werden, da das Entfernen einer Kante zu einer völlig neuen Verteilung der Betweenness-Zentralität geführt hat. Im Ergebnis bedeutet es, dass im Straßennetz Schlüsselstellen bestehen, die in vielen Pfaden enthalten sind, und für die nur begrenzte Ausweichmöglichkeiten bestehen.

Betrachtet man die echte Welt im Vergleich, lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Robustheit und der Struktur der Städte und ihrer Straßennetze erkennen: Anfälligere Netze weisen meist natürliche Begrenzungen wie Flüsse auf, die eine Bündelung des Straßenverkehrs auf Brücken oder Tunnels bewirken. Auch Verbindungsstraßen zwischen Orten oder überörtliche Verbindungsstraßen sind meist betroffen; jedoch gibt es dort meist mehr alternative Wege. Dies wird vermutlich auch mit Kosten entsprechender Infrastruktur zusammenhängen. Hingegen wurde bei Städten ohne geographische Auffälligkeiten beziehungsweise im dichten Stadtkern meist eine höhere

Widerstandsfähigkeit der Straßennetze gegenüber strategischen Angriffen festgestellt. Dies lässt sich damit begründen, dass bei Ausfällen im Netz ohne Zwangspunkte viele alternative Pfade über das Nebenstraßennetz bestehen. Den Extremfall würde hier eine schachbrettartige Stadt darstellen, was sich in einer Graphenrepräsentation mit regelmäßiger Gitterstruktur ausdrücken würde.

Einschränkungen

Im vorgestellten Ansatz zur Ermittlung der Robustheit gelten zwei beliebige Knoten als verbunden, solange ein Pfad zwischen ihnen existiert. Im Straßenverkehr spielen jedoch auch die Kapazität und Verkehrsauslastung einer Straße eine wichtige Rolle. Diese wurden hier nur eingeschränkt über die voraussichtliche Reisezeit beziehungsweise die Höchstgeschwindigkeit der Straße berücksichtigt. So kann beispielsweise die Verkehrslast einer gesperrten Stadtautobahn nicht von einer beliebigen Nebenstraße aufgenommen werden. In der Folge ist zu erwarten, dass in der Realität der Ausfall weniger wichtiger Knotenpunkte bereits zu erheblichen Einschränkungen führt. Ein solcher Ausfall kann auch zur Überlastung der Alternativstraßen führen und diese infolge durch Staus massiv einschränken. Insofern kann man in der realen Welt auch von deutlichen Auswirkungen auf die Reisezeit der Verkehrsteilnehmer ausgehen. Erschwerend kommt hinzu, dass hier das Straßennetz als ungerichteter Graph betrachtet wurde. Diese Annahme ist nicht realitätstreu, da zum Beispiel Autobahnen (beide Fahrtrichtungen werden in OSM als eigene Kante geführt) nicht beidseitig befahrbar sind. Dadurch wurde im Graphenmodell die Kapazität also für einige Hauptverkehrsstraßen sogar doppelt so hoch berücksichtigt.

Eine weitere Einschränkung kommt hinzu: Die voraussichtliche Reisezeit der Straßen ist statisch. Der Wert liefert lediglich einen Anhaltswert der benötigten Zeit bei "freier Bahn". Für eine realistische Berechnung der Reisezeit müssten weitere Annahmen, wie Wartezeiten an Ampeln, Ausbauzustand der Straße, sowie Eigenschaften des gewählten Fahrzeugs berücksichtigt werden. Insbesondere ist die Zeit wie oben dargestellt dynamisch und abhängig von der Verkehrslage im aktuellen Zeitpunkt.

Ungeachtet der genannten Einschränkungen bildet die gewählte Methode jedoch einen möglichen Ansatz, um kritische Stellen im Straßennetz zu identifizieren und die Robustheit von Straßennetzen untereinander zu vergleichen.

Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Seminararbeit wurden Themen angerissen, die Grundlage für eine weitergehende Untersuchung bieten könnten: Ein mögliches Untersuchungsobjekt wäre der Vergleich verwandter Verkehrsnetze. Die vorgestellte Methodik ist mit kleinen Anpassungen auch auf die OpenStreetmap-Datensätze für Radwege und Fußwege anwendbar. Diese stellen eine Erweiterung der untersuchten Straßennetze um nicht befahrbare, öffentliche Bereiche wie Fußgängerzonen und Parks dar. Aufgrund von zusätzlichen Abkürzungen und Querverbindungen zwischen bestehenden Knoten sind höhere Knotengrade und eine höhere Robustheit zu erwarten, als in den Straßennetzen festgestellt wurde. Aufgrund der erhöhten Knotenzahl ist eine Einschränkung auf einzelne Stadtbezirke oder kleinere Städte sinnvoll, was auch der im Alltag zu Fuß oder mit dem Rad zurückgelegten Strecke entspricht.

Eine weitere Herangehensweise könnte sein, überregionale Straßennetze in einem kleineren Maßstab zu untersuchen. Hierbei rücken Landstraßen und Autobahnen in den Fokus, während städtische und örtliche Gemeindenetze aufgrund Rechenzeitbedenken zu Knoten zusammengefasst werden müssten. Aufgrund der stärkeren Abstraktion sind, ähnlich dem dualen Graph, stärkere Small-World und Skalenfreiheitseffekte zu erwarten, als im primalen Graphen der untersuchten städtischen Straßennetze.

Fazit

Anhand der vorgestellten Methodik ist es gelungen, die Straßendaten deutscher Gemeinden herunterzuladen und auszuwerten. Die Erkenntnisse der vorliegenden Literatur konnten anhand der resultierenden Netze nachvollzogen werden.

In den Straßennetzen wurden unterschiedliche Hierarchieebenen von Straßentypen festgestellt: Das Spektrum bewegt sich zwischen wenigen, stark ausgebauten Hauptverkehrsachsen und einer großen Mehrheit an kleinen Anbindungsstraßen. Diese Eigenschaften lassen sich anhand der Betweenness- und der Closeness-Zentralitätsmaße nachvollziehen. Bei Einbeziehung der theoretischen Reisegeschwindigkeit treten die Unterschiede zwischen den Straßenarten besonders hervor.

Um die besonderen Eigenschaften entsprechend der Theorie der komplexen Netze tiefergehend zu untersuchen, wurden sogenannte duale Repräsentationen der Straßennetze erzeugt. Diese wiesen gegenüber den Ausgangsnetzen ausgeprägtere Small-World-Eigenschaften auf. Außerdem konnte bei den dualen Graphen anhand der Gradverteilung Skalenfreiheit nachgewiesen werden.

Außerdem wurde die Robustheit der Straßennetze anhand der primalen Graphen untersucht. Hierzu wurden zufällige und strategische Angriffe simuliert und der Einfluss auf das Gesamtnetz bewertet. Dabei wurde festgestellt, dass allgemein eine hohe Resilienz gegenüber zufälligen Kantenausfällen besteht, aber durch gezieltes Auswählen anhand der Betweenness-Zentralität schnell eine Teilung des Netzes herbeigeführt werden kann. Tendenziell wurde Straßennetzen eine höhere Robustheit festgestellt, wenn die Städte über keine geographischen Besonderheiten wie Flüsse verfügen, da diese möglichen Pfade einschränken und somit zu Schwachstellen im Netz führen.

Literaturverzeichnis

- [1] S. H. Strogatz, „Exploring complex networks“, *Nature*, Bd. 410, Nr. 6825, Art. Nr. 6825, März 2001, doi: 10.1038/35065725.
- [2] S. Porta, P. Crucitti, und V. Latora, „The Network Analysis of Urban Streets: A Primal Approach“, *Environ Plann B Plann Des*, Bd. 33, Nr. 5, S. 705–725, Okt. 2006, doi: 10.1068/b32045.
- [3] R. Ding u. a., „Application of Complex Networks Theory in Urban Traffic Network Researches“, *Netw Spat Econ*, Bd. 19, Nr. 4, S. 1281–1317, Dez. 2019, doi: 10.1007/s11067-019-09466-5.
- [4] S. Porta, P. Crucitti, und V. Latora, „The network analysis of urban streets: A dual approach“, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Bd. 369, Nr. 2, S. 853–866, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.physa.2005.12.063.
- [5] A. P. Masucci, K. Stanilov, und M. Batty, „Exploring the evolution of London’s street network in the information space: A dual approach“, *Phys. Rev. E*, Bd. 89, Nr. 1, S. 012805, Jan. 2014, doi: 10.1103/PhysRevE.89.012805.
- [6] M. Bastian, S. Heymann, und M. Jacomy, „Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks“, *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, Bd. 3, Nr. 1, Art. Nr. 1, März 2009, doi: 10.1609/icwsm.v3i1.13937.
- [7] B. Jiang und C. Claramunt, „Topological Analysis of Urban Street Networks“, *Environ Plann B Plann Des*, Bd. 31, Nr. 1, S. 151–162, Feb. 2004, doi: 10.1068/b306.
- [8] A. B. Downey, *Think complexity: exploring complexity science with Python*, 1. ed. Beijing Köln: O’Reilly, 2012.
- [9] D. J. Watts und S. H. Strogatz, „Collective dynamics of ‚small-world‘ networks“, *Nature*, Bd. 393, Nr. 6684, S. 440–442, Juni 1998, doi: 10.1038/30918.
- [10] A.-L. Barabási und R. Albert, „Emergence of Scaling in Random Networks“, *Science*, Bd. 286, Nr. 5439, S. 509–512, Okt. 1999, doi: 10.1126/science.286.5439.509.
- [11] S. Lämmer, B. Gehlsen, und D. Helbing, „Scaling laws in the spatial structure of urban road networks“, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Bd. 363, Nr. 1, S. 89–95, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.physa.2006.01.051.
- [12] T. S. Gelaye, „Robustness of road network for assessing the resilience of the network“, masterThesis, 2019. Zugriffen: 13. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://run.unl.pt/handle/10362/67709>
- [13] D. S. Callaway, M. E. J. Newman, S. H. Strogatz, und D. J. Watts, „Network Robustness and Fragility: Percolation on Random Graphs“, *Phys. Rev. Lett.*, Bd. 85, Nr. 25, S. 5468–5471, Dez. 2000, doi: 10.1103/PhysRevLett.85.5468.
- [14] M. Snelder, H. J. van Zuylen, und L. H. Immers, „A framework for robustness analysis of road networks for short term variations in supply“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 46, Nr. 5, S. 828–842, Juni 2012, doi: 10.1016/j.tra.2012.02.007.
- [15] S. Iyer, T. Killingback, B. Sundaram, und Z. Wang, „Attack Robustness and Centrality of Complex Networks“, *PLOS ONE*, Bd. 8, Nr. 4, S. e59613, Apr. 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0059613.
- [16] G. Boeing, „OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks“, *Computers, Environment and Urban Systems*, Bd. 65, S. 126–139, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004.
- [17] A. A. Hagberg, D. A. Schult, und P. J. Swart, „Exploring Network Structure, Dynamics, and Function using NetworkX“, in *Proceedings of the 7th Python in Science Conference*, G. Varoquaux, T. Vaught, und J. Millman, Hrsg., Pasadena, CA USA, 2008, S. 11–15.
- [18] T. P. Peixoto, „The graph-tool python library“. figshare, S. 136152697 Bytes, 2017. doi: 10.6084/M9.FIGSHARE.1164194.
- [19] G. Boeing, „A multi-scale analysis of 27,000 urban street networks: Every US city, town, urbanized area, and Zillow neighborhood“, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Bd. 47, Nr. 4, S. 590–608, Mai 2020, doi: 10.1177/2399808318784595.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Primale Repräsentation des Straßennetzes eines kleinen Ausschnitts der Stadt Hagen, Nordrhein-Westfalen, Deutschland.....	4
Abbildung 2 (links): Die Bundesstraße 455 in Südhessen endet wegen Baus der Autobahnen A661 und A5. Der Name ist historisch bedingt, jedoch ist er nicht mehr repräsentativ für die Funktion der Straßen im Straßennetz. Räumlich handelt es sich um zwei unterschiedliche Straßen.....	5
Abbildung 3 (rechts): Der umgangssprachlich so genannte „zweite Ring“ in Wiesbaden besteht aus Straßen mit unterschiedlicher Bezeichnung (Zietenring, Loreleiring, ...). Trotz unterschiedlicher Bezeichnungen hat der Straßenzug für das Verkehrsnetz eine vergleichbare Funktion wie die zentral gelegene Hauptstraße.	5
Abbildung 4: Der duale Graph der Stadt Wiesbaden. Links die reguläre Repräsentation eines Graphen. Rechts die Darstellung innerhalb der primalen Graphen. Die Knoten des dualen Graphen sind rechts nach ihrem Knotengrad koloriert.	6
Abbildung 5: Border-Effekt dargestellt am Beispiel der Stadt Hagen; links: Kanten sind nach Betweenness-Zentralität eingefärbt, hohe Werte sind heller. Der Border-Effekt lässt Straßenteile am Rand dunkler erscheinen obwohl die Wege für den überörtlichen Verkehr relevant bleiben. Rechts: Closeness-Zentralität der Kanten. Die starke Abhängigkeit vom gewählten Ausschnitt wird deutlich...	8
Abbildung 6 (links): Eine Darstellung des dualen Graphen innerhalb eines primalen Graphen. Unterschiedliche Knoten des dualen Graphen sind unterschiedlich koloriert. Kanten werden implizit dadurch dargestellt, dass eine Kreuzung zwischen den Straßenzügen besteht.....	11
Abbildung 7 (rechts): Zwei Kanten des primalen Graphen werden im dualen Graphen zu einem Knoten zusammengefügt, wenn sie im Straßennetz auf der gleichen Hierarchie sind (z.b. highway=“primary“) und sie zueinander den höchsten konvexen Winkel haben. Hier werden also die Segmente a und c zu einem Knoten im dualen Graphen.	11
Abbildung 8: Gemeindegrenzen in Hagen, Nordrhein-Westfalen, Deutschland und Umgebung. Abgefragt mit der Overpass-Turbo-Schnittstelle des OSM-Projekts.	12
Abbildung 9: Netzdurchmesser im Verhältnis zur Stadtfläche	14
Abbildung 10: Durchschnittliche Pfadlängen	15
Abbildung 11: Clustering-Koeffizient.....	16
Abbildung 12: Beispiel für die Verteilung der lokalen Clustering-Koeffizienten (höhere Werte sind mit helleren Farben dargestellt)	17
Abbildung 13: Knotengradverteilung der primalen Graphen (oben) und der dualen Graphen (unten) ausgewählter Städte.....	17
Abbildung 14: Closeness-Zentralität am Beispiel Berlin.....	19
Abbildung 15: Betweenness-Zentralität am Beispiel Berlin	20
Abbildung 16: Links: Entwicklung der durchschnittlichen Pfadlänge der in dem Schritt größten Komponente der Stadt Frankfurt am Main mit zunehmender Anzahl entfernter Kanten (X-Achse) bei Anwendung der unterschiedlichen Kantenentfernungsstrategien. Rechts: Mit Gewichtung der Pfadlänge nach der Reisezeit.....	22
Abbildung 17: Die Abbildung zeigt für die untersuchten Städte die Anzahl an entfernter Knoten in %, die nötig waren, um das Netz in zwei Komponenten zu zerlegen. Die Städte sind dabei auf der X-Achse nach der Anzahl der Knoten der Straßennetze sortiert.	23