



# Master Thesis

im Rahmen des  
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“  
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für Geoinformatik (Z\_GIS)  
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

**„GIS-basierte Bewertung von Nahverkehrsnetzen  
durch einen Umweltverband mit frei verfügbaren  
Daten“**

-

**Am Beispiel Münchens**

vorgelegt von

**M.A. Dominik Lypp**  
102585, UNIGIS MSc Jahrgang 2012

Zur Erlangung des Grades  
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:  
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

München, 28.02.2015

## 1 INHALT

2	Erklärung .....	iv
3	Verzeichnis der Abbildungen, Tabellen und Karten.....	v
4	Einleitung .....	1
5	Bedeutung von Verkehr in Urbanen Räumen .....	3
5.1	Entstehung von Verkehr.....	3
5.2	Unterschied zwischen Mobilität und Verkehr .....	4
5.3	Interesse eines Umweltverbands an Mobilität und Verkehr .....	5
5.4	Erreichbarkeit.....	6
6	Erklärungsansätze für Verkehrsnetze .....	10
6.1	Unterschied zwischen ÖPNV- und Strassen-Netzen .....	10
6.2	Graphentheorie als Erlärungsansatz für Netzwerkstrukturen .....	11
6.2.1	Entstehung der Graphentheorie .....	11
6.2.2	Graphentheorie im Verkehrsbereich .....	12
6.3	Weiterentwicklung der Graphentheorie.....	16
6.3.1	Small-world und scale-free-Netzwerke.....	16
6.3.2	Graphenthoretische Betrachtung von DERRIBLE und KENNEDY .....	18
6.3.3	Vulnerability Analysis .....	23
6.4	Zusammenfassung .....	27
7	GIS-basierte Anwendungskonzepte .....	28
7.1	Operationalisierung von Netzwerken in GIS allgemein .....	28
7.2	Spatial Network Analysis of Public Transport Accessibility (SNAPTA) .....	29
7.3	Spatial Network Analysis for Multimodal Urban Transport Planning (SNAMUTS).....	32
7.3.1	Ziele von SNAMUTS.....	32
7.3.2	Operationalisierung der SNAMUTS-Indikatoren.....	34
7.3.3	Bedeutung von SNAMUTS.....	37
7.3.4	SNAMUTS Ergebnisse für München.....	38

7.4	General Transit Feed Specification als Analysegrundlage .....	42
7.4.1	Definition GTFS.....	42
7.4.2	Einsatz von GTFS zur Analyse von ÖPNV-Netzen.....	42
7.5	Zusammenfassung .....	44
8	OpenData und frei verfügbare Daten in der Analyse.....	46
8.1	Definition und Abgrenzung .....	46
8.1.1	Definition von OpenData .....	46
8.1.2	Abgrenzung zu anderen Datenbeständen .....	47
8.2	OpenData: Freiwillige Beteiligung und Datenqualität .....	48
8.3	Qualität freier Daten .....	49
8.4	Das Beispiel OpenStreetMap .....	49
8.4.1	Abweichung bei Punkt-Features.....	50
8.4.2	Vollständigkeit von Line-Features in OSM .....	51
8.4.3	Polygonbestände in OpenStreetMap.....	52
8.5	Genauigkeit von OSM im Untersuchungsgebiet .....	55
8.5.1	Genauigkeit von ÖPNV-Features in OSM.....	55
8.5.2	Wiedergabe von Punkt-Features .....	56
8.5.3	Bestand an Linien-Features in OSM .....	58
8.5.4	OSM-Polygonbestände im Untersuchungsgebiet .....	59
8.5.5	Bewertung der OpenStreetMap-Daten.....	60
9	Analyse eines Nahverkehrsnetzwerks: Das Beispiel München.....	62
9.1	Analyse mit OpenStreetMap-Daten.....	63
9.1.1	Einzugsbereich um Haltestellen .....	63
9.1.2	Indikator Stationsabstand .....	67
9.1.3	Fazit .....	69
9.2	Analyse mit frei verfügbaren Daten .....	69
9.2.1	Ermittlung der Bedeutung von Stationen mit Fahrplandaten .....	69
9.2.2	Störungsmeldungen als Anzeiger für Verlässlichkeit .....	72

9.2.3	Bewertung der Analyse mit frei verfügbaren Datenquellen.....	78
10	Fazit.....	80
11	Annex.....	82
11.1	Einflussfaktoren auf Verkehrsnachfrage.....	82
11.2	Verkehrsmittel und Modal Split.....	82
11.3	Definition Transit Oriented Development (TOD).....	83
11.4	Definitionen Erreichbarkeit.....	83
11.5	Auswirkungen der Störungen.....	86
11.6	MVG, MVV und das Münchner Liniennetz.....	86
12	Literatur.....	88

## 2 ERKLÄRUNG

Ich versichere diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

München, 28.02.15

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Dominik Gyp', is written in a cursive style.

### 3 VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN, TABELLEN UND KARTEN

#### ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Netzplan Münchens .....	10
Abbildung 2: Eulers Brücken in Königsberg .....	11
Abbildung 3: Vergleich von Netzwerken.....	17
Abbildung 4: Metrosysteme und ihre Entwicklungsstufen.....	19
Abbildung 5: Ausrichtung von Metrosystemen .....	20
Abbildung 6: Strukturelle Konnektivität von Metrosystemen .....	22
Abbildung 7: Robustheit von Metronetzen .....	24
Abbildung 8: Abbildung von Netzwerken in GIS .....	28
Abbildung 9: Ergebnisse von SNAPTA-Analysen .....	31
Abbildung 10: Ergebnis des Service Intensity Vergleichs.....	38
Abbildung 11: Vergleich der Zentralität des Grades.....	39
Abbildung 12: SNAMUTS Vergleich Netzverknüpftheit .....	40
Abbildung 13: Ergebnisse der SNAMUTS-Analyse der lokalen Zwischenlage in München ...	41
Abbildung 14: Ablauf der GTFS-Analyse nach HADAS .....	43
Abbildung 15: Straßendaten in OpenStreetMap .....	51
Abbildung 16: Methoden zur Bestandsermittlung von Gebäuden in OSM .....	53
Abbildung 17: OSM-Gebäudedaten in Leipzig .....	54
Abbildung 18: OSM-Punktdatensatz.....	56
Abbildung 19: U-Bahn-Ausgänge Messestadt West .....	57
Abbildung 20: Fehlerhafte Linien-Features in OSM.....	58
Abbildung 21: Gebäude mit Nutzungs-Attribuierung.....	59
Abbildung 22: Vergleich von Gebäuden mit und ohne Nutzungs-Attribuierung.....	60
Abbildung 23: Nicht-bedientes Gebiet .....	64
Abbildung 24: Fehlende Erschließung.....	65
Abbildung 25: GIS-basierte Auswertung der Störungs-Auswirkungen .....	75
Abbildung 26: Einflussgrößen der Verkehrsnachfrage .....	82
Abbildung 27: Organisationsform und Verkehrsweg.....	82
Abbildung 28: Netzplan der Schnellbahnen mit Tram und Express-Bus .....	87

## **TABELLEN**

Tabelle 1: Netzlänge, Stationen und Stationsabstände .....	67
Tabelle 2: Gründe der Störungen.....	73
Tabelle 3: Auflistung der Störungsursache nach Linie .....	86

## **KARTEN**

Karte 1: Einzugsbereiche des ÖPNV und nicht-bediente Gebäude	66
Karte 2: Stationsabstände der Münchner Verkehrsmittel	68
Karte 3: Zentralität der Münchner Haltestellen	71
Karte 4: Infrastruktur und Störmeldungen	74
Karte 5: Auswertung der Störungsmeldungen der S-Bahn-München	77

## 4 EINLEITUNG

Die Bewertung von Öffentlichen Nahverkehrsnetzwerken (Public Transport Networks, PTN) stellt ein eigenes Forschungsziel dar. PTNs wurden und werden aus den verschiedensten Blickwinkeln betrachtet. Das bekannteste Vorgehen dürfte die Berechnung des Zugangs zu öffentlichem Nahverkehr bzw. die Erreichbarkeit von Destinationen mit Hilfe des Öffentlichen Nahverkehrs (ÖV) sein. KAROU und HULL erarbeiten sogar 31 mögliche verschiedene Blickwinkel für die Bemessung von Erreichbarkeit (KAROU & HULL 2012). Diese Indikatoren tauchen in GIS-Anwendungen zur Erreichbarkeitsanalyse wieder auf (KAROU & HULL 2014, O'SULLIVAN et al. 2000). Darüber hinaus spielen Fragen der Umweltverträglichkeit von Transportsystemen und der Verkehrspolitik sowie das Erreichen von Umweltzielen eine tragende Rolle (VOS & WITLOX 2013). Für die urbane Mobilität ist besonders die Ausgestaltung der Netze im Stadtraum von Wichtigkeit. Neben der reinen Charakterisierung der Netze, DERRIBLE und KENNEDY unterscheiden hier drei Hauptkriterien, nämlich „state“ (einfach oder komplex), „form“ (räumliche Beziehung Netzwerk und Umgebung) sowie „structure“ (connectivity und directness) (DERRIBLE & KENNEDY 2010a) hat sich die Vulnerabilität von öffentlichen Verkehrsnetzen als bedeutendes Forschungsthema herauskristallisiert. Nicht nur Terrorakte wie in New York, London oder Madrid sondern auch Naturkatastrophen (Hurrikans wie Sandy in New York [FLEGENHEIMER 2012, ROSENTHAL 2012] oder Erdbeben) haben negative Auswirkungen auf Verkehrssysteme (RODRÍGUEZ-NÚÑEZ & GARCÍA-PALOMARES 2014, CATS & JENELIUS 2012). Eine besonders häufig verwendeter Ansatz dabei ist, die Netzwerke graphentheoretisch zu betrachten (MISHRA et al. 2012).

Für Nichtregierungsorganisationen (NGO), die in den Bereichen Verkehr und Umweltschutz tätig sind, können einige dieser Ansätze interessante Ergebnisse liefern. So geht SCHWARZE (SCHWARZE 2002) davon aus, dass Geographische Informationssysteme Kommunen bei der Bewertung von ÖPNV-Planungen unterstützen. Auf Grund der angespannten Finanzlage seien GIS-basierte Bewertungen effizient, da sie ohne den hohen finanziellen Aufwand von Verkehrssimulationen auskommen, aber in der Genauigkeit über einfache Bewertungsindikatoren hinausgehen (SCHWARZE 2002, SCHWARZE 2003). Genau dieser hohe finanzielle Aufwand kann gerade von vielen NGOs nicht geleistet werden. Dazu kommt noch, dass Umweltorganisationen zum Teil nicht alle für eine klassische Analyse notwendigen Daten zur Verfügung stehen. So erklärt die DB AG beispielsweise ihre Daten zur Infrastrukturqualität zu Betriebsgeheimnissen (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE 2011) oder es wurde dem Bund für Umwelt- und



Naturschutz Deutschland (BUND) gerichtlich bestätigt, dass Planungsbüros ihre Datenbasis, auf der Straßenbaumaßnahmen begründet werden, Dritten nicht zugänglich machen müssen (VERWALTUNGSGERICHT POTSDAM 2014). Um trotzdem ihre Interessen, bzw. die ihrer Mitglieder, gegenüber der Verwaltung und der Politik zu vertreten und zu Projekten genauso wie Träger öffentlicher Belange (TÖB) Stellung nehmen zu können, benötigen sie neben der Expertise ihrer Angestellten oder ehrenamtlich Tätiger dennoch ein Mindestmaß an Daten, um sachlich argumentieren zu können und Zusammenhänge darzustellen. GI-Systeme sind in der Lage die Auswirkungen von Infrastrukturmaßnahmen klar verständlich darzustellen, wenn sie auf belastbaren Daten aufbauen können. Ziel ist es daher zu klären, ob freie und frei verfügbare Daten - der Unterschied wird im Folgenden noch genauer erläutert - nicht zugängliche Datenquellen ersetzen und Umweltverbände mit Hilfe von GI-Systemen aussagekräftigen Analyse-Resultate erzielen können. Die Frage, ob Open Source Software aus dem Geoinformationsbereich diese Aufgabe meistern kann, soll hier nicht gestellt werden.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt. Zuerst werden wichtige Grundbegriffe von Verkehr und Mobilität sowie das generelle Interesse eines Umweltverbandes an diesen erläutert. Danach werden theoretische Ansätze zur Beschreibung von Verkehrsnetzen vorgestellt und dabei insbesondere die Graphentheorie stärker beleuchtet. Diese Erklärungsmuster sind grundsätzlicher Natur und daher nicht zwangsläufig auf den Einsatz in GIS ausgerichtet. Daher werden im nächsten Schritt GIS-basierte Werkzeuge zur PTN-Analyse vorgestellt und ausgewertet. Es wird sich zeigen, dass diese auf vielfältige Datenquellen angewiesen sind, die einem Umweltverband teilweise nicht zur Verfügung stehen. Es werden folglich frei verfügbare Datenquellen vorgestellt und deren Eignung für die Bewertung von Nahverkehrssystemen aus wissenschaftlicher Literatur ermittelt. Anschließend werden die aus der Graphentheorie und den GIS-basierten Bewertungen herausgearbeiteten Analyse-Indikatoren auf das Münchner Nahverkehrssystem angewendet. Als Datengrundlage dienen hierbei frei und frei verfügbare Datenquellen. Die Resultate dieser Analyse werden schließlich mit bereits bestehenden Ergebnissen anderer Untersuchungen verglichen und abschließend beurteilt.

## 5 BEDEUTUNG VON VERKEHR IN URBANEN RÄUMEN

### 5.1 ENTSTEHUNG VON VERKEHR

Verkehr entsteht, wenn Menschen versuchen ihre verschiedenen Bedürfnisse zu befriedigen. Die stadträumliche Gliederung führt dazu, dass Distanzen überwunden werden müssen. Die Flächenkonkurrenz verschiedener Raumnutzungen führt zu einer Aufteilung von Stadtraum. Explizit gefordert wurde diese funktionelle Trennung in Gebiete für Wohnen, Freizeit, Arbeiten und Verkehr in der Charta von Athen. In den 1960er Jahren hielt diese Vorstellung in der Bundesrepublik Deutschland Einzug und beeinflusste die Baugesetzgebung. Die aufgelockerte und gegliederte Stadt war das Postulat der Nachkriegszeit (HEINEBERG 2001). Allerdings zeigen bereits die klassischen Stadtentwicklungsmodelle (z.B. HOYTS Sektorenmodell<sup>1</sup>), dass es zu räumlichen Konzentrationsprozessen von homogenen Gruppen bzw. Nutzungsformen kommt. Diese räumliche Trennung geht mit der Notwendigkeit einher, die verschiedenen Funktionsbereiche durch Verkehrsmittel zu verbinden. So führte beispielsweise die Lagegunst, die es erlaubte schneller sowohl im Zentrum der Stadt als auch auf freiem Land zu sein, entlang von Verkehrswegen zu höheren Mieten (HEINEBERG, 2001). Die Entwicklung der modernen Stadt ist daher an die Weiterentwicklung der Verkehrstechnologien geknüpft.

KIRCHHOFF (KIRCHHOFF 2002) sieht einen Zusammenhang zwischen privaten und wirtschaftlichen Aktivitäten und der Entstehung von Verkehr. Sowohl die Bevölkerung als auch die Wirtschaft erzeugen durch ihre Aktivitäten Verkehr. Über die bereits in der Charta von Athen genannten Funktionen hinaus, sieht KIRCHHOFF im privaten Bereich z.B. auch Erledigen, Versorgen und Bilden als induzierende Funktionen. Darüber hinaus geht er auch davon aus, dass das Angebot von Verkehrsmitteln dazu führt, dass diese genutzt werden.

*Verkehrsnachfrage und Verkehrsangebot stehen in Wechselwirkung zueinander: Die Verkehrsnachfrage ist Eingangsgröße für die Dimensionierung des Verkehrsangebots und bestimmt dessen Qualität und den Umfang. Das Verkehrs-*

---

<sup>1</sup> During the 1930s, it was also recognized that the spatial importance of rail lines was not just limited to their capacity as inter-urban infrastructure networks. After completing a study of rental values in 142 American cities, Homer Hoyt (1939) concluded that the organization of cities was more appropriately characterized by sectors rather than concentric zones, as suggested by Ernest Burgess (1925). Hoyt recognized that lower-income groups extended out in linear sectors from the inner city following industries, which themselves followed railroad lines ( BUNTING & FILION 2006).

*angebot beeinflusst seinerseits die Verkehrsnachfrage und hierbei insbesondere die Verkehrsmittelwahl (KIRCHHOFF 2002).*

Er zeigt damit auf, dass nicht nur die räumliche Trennung zu Verkehr bzw. zu mehr Verkehr führen kann, sondern auch die Ausstattung eines Raumes bzw. einer Person mit Mobilitätsmöglichkeiten. Das heißt, dass die Verfügbarkeit von privatem Kraftfahrzeug oder Fahrrad genauso wie das Vorhandensein von ÖPNV-Zugangsmöglichkeiten und des ÖPNV-Angebots, das Mobilitätsverhalten direkt beeinflussen. Während die räumliche Trennung von Funktionen geographisch beschreibbar ist und sich damit auch bestens für die GIS-basierte Analyse eignet, sind verhaltenstheoretische Erklärungsansätze nur schwerlich allein mit geographischen Informationssystemen darstellbar. Deswegen wird der Fokus in dieser Arbeit auf die räumliche Trennung gelegt.

## 5.2 UNTERSCHIED ZWISCHEN MOBILITÄT UND VERKEHR

Im umgangssprachlichen Gebrauch werden die beiden Begriffe „Mobilität“ und „Verkehr“ synonym gebraucht. Im verkehrsgeographischen Kontext hingegen besteht ein Unterschied. Hier steht Mobilität für die Bewegung bzw. Beweglichkeit an sich. D.h., dass neben der tatsächlichen auch eine theoretische Ortsveränderung verstanden werden kann. Es geht dabei sowohl um die Bereitschaft zur Ortsveränderung als auch darum, dass die geistige Beweglichkeit als Voraussetzung zur Teilhabe am gesellschaftlichen Leben sein kann. Mobilität im räumlichen Bezug wird durch die Zahl an Aktivitäten pro Zeiteinheit bei Personen und im Güterverkehr als Menge der transportierten Güter gemessen. Verkehr hingegen ist allein die vollzogene Ortsveränderung. Bewegungen an einem Standort (Arbeitsstelle, Haushalt) gehören nicht dazu. Es geht also um die „physische Bewegung von Einheiten entlang von Kanten in einem Netzwerk oder einer Route auf einer Verkehrsinfrastruktur [...]“. In der Beschreibung des Verkehrs wird differenziert nach Verkehrsmittel, -zwecken oder beförderten Gütern“ (NUHN & HESSE 2006). Der entscheidende Unterschied zwischen Mobilität und Verkehr liegt also darin, dass mit Mobilität die Fähigkeit eines Individuums oder eines Gutes zur theoretischen Ortsveränderung beschrieben wird, während Verkehr die Realisierung dieser Möglichkeit ist (NUHN & HESSE 2006, LESER et al. 2001).

### 5.3 INTERESSE EINES UMWELTVERBANDS AN MOBILITÄT UND VERKEHR

In Städten zeigen sich die angesprochenen Auswirkungen der Funktionstrennung. Um zu den Bereichen Wohnen, Arbeiten, Versorgen und Freizeit zu gelangen, nutzen Städter die verschiedensten Transportmittel. Dabei sind das Fahrradfahren und Zufußgehen die Arten der Mobilität, die am wenigsten gebaute Infrastruktur und damit auch Platz im Stadtraum benötigen. Zudem kommen sie ohne die Verbrennung von Kraftstoffen aus, weder zur direkten Verbrennung in einem Motor oder zur Stromgewinnung für elektrisch betriebene Fahrzeuge und sind somit frei von Emissionen. Laut des BUND: „[hat k]ein anderes Verkehrsmittel, von den eigenen Füßen einmal abgesehen, [...] eine so gute Umweltbilanz wie das Fahrrad. Es produziert keine Schadstoffe, keinen Lärm, braucht wenig Platz und ist gut für Gesundheit und Fitness. Obendrein schont das Radfahren die privaten und öffentlichen Finanzen“ (BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND 2014b). KNOFLACHER schreibt dazu, dass die zweckbezogene energetische Flächeneffizienz von Radfahrern und Fußgängern um das rund 600-fache<sup>2</sup> höher als jene des Autoverkehrs sei (KNOFLACHER 2007). Trotzdem erbringt die motorisierte individuelle Mobilität (MIV), sprich das Auto, weiterhin die größte Transportleistung. In der Bundesrepublik Deutschland werden 58 Prozent der Wege entweder direkt als MIV-Fahrer (43%) oder als MIV-Mitfahrer (15%) zurückgelegt. Selbst in Städten werden trotz der geringeren zu überwindenden Distanzen und des einfacheren Zugangs zu Angeboten des ÖPNV noch 43 Prozent der Wege im MIV (Fahrer 31%, Mitfahrer 12%) zurückgelegt (MÜNCHEN & MÜNCHNER VERKEHRS- UND TARIFVERBUND 2010). Insgesamt betrachtet machen Fahrrad- und Fußverkehr in den Kernstädten der BRD im Jahr 2008 40 Prozent der Wege aus.

Die weiterhin starke Nutzung der Motorisierten Individuellen Mobilität stellt für die Städte ein großes Problem dar und muss aus Sicht der Umweltverbände dringend zurückgedrängt werden. Laut SUSNIENÉ stehen dabei zwei Faktoren im Vordergrund. Die Lärmentwicklung geht zu 60 bis 80 Prozent von Verkehrsmitteln aus und wirkt sich auch nachteilig auf Wohngebiete und die Bevölkerung aus. Zudem ist die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern ein weiteres Problem. „Transport accounted for close to a quarter (23,8%) of the total GHG<sup>3</sup> emissions and slightly more than a quarter (27,9%) of the total CO<sub>2</sub> emissions in the EU-27 in 2006. Compared with levels in 1990, no other sector has got the

---

<sup>2</sup> Energieeffizienz dabei mit dem Faktor 100, die Flächeneffizienz mit dem Faktor 6 vertreten (KNOFLACHER 2007).

<sup>3</sup> GHG = Green House Gas(es)

growth rate of GHG emissions as high as that of transport" (SUSNIENÉ 2012). Die Umweltverbände sehen sich hier zum einen als Interessensvertreter der Stadtbevölkerung und versuchen immer wieder die Belastungen unter die gesetzlich zulässigen Grenzwerte zu drängen. Zum Teil werden Klagen eingereicht (DEUTSCHE UMWELTHILFE 2014). Darüber hinaus haben sie aber auch den Anspruch ganz generell den Klimawandel aufzuhalten (REH & OMIETANSKI 2014). Sie fordern daher ein Maßnahmenpaket aus neuen, niedrigeren gesetzlichen Grenzwerten beim Ausstoß, Tempolimits und als oberstes Ziel eine Verlagerung des Verkehrs (BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND 2014a). Dabei muss ein Angebot offeriert werden, dass für die Bewohner des Gebiets attraktiv ist und damit eine Änderung im Modal Split<sup>4</sup> weg vom Auto auslöst. Dabei kann laut SUSNIENÉ der ÖPNV eine Rolle spielen, wenn es gelingt Pendler aus dem Auto zu holen. CURTIS und SCHEURER verweisen dabei auf die Problematik des Rauminhalts und der Notwendigkeit Raum attraktiv zu planen. „It is thus argued that TOD<sup>5</sup> provides a more environmentally sustainable form of urban development by reducing the need to travel and facilitating a modal shift among residents away from the car" (CURTIS & SCHEURER 2010). Sowohl SUSNIENÉ als auch CURTIS und SCHEURER nehmen an, dass nur attraktive Alternativen zum Auto diesen Effekt haben werden. Zudem muss die geistige Beweglichkeit (siehe Punkt Mobilität und Verkehr) vorhanden sein, um ÖPNV als Alternative zur Ortsveränderung zu erkennen (CURTIS & SCHEURER 2010, SUSNIENÉ 2012). Zudem gilt aus Sicht der Umweltverbände, dass sowohl Zugangspunkte als auch Ziele gut mit Alternativen erschlossen sein müssen, um den Umstieg zu ermöglichen. Damit ist ein wichtiger verkehrsgeographischer Begriff genannt: Erreichbarkeit.

#### 5.4 ERREICHBARKEIT

Die Erreichbarkeit wird oft als Indikator verwendet, wobei die Definition dessen, was durch den Begriff Erreichbarkeit abgebildet wird, nicht über alle Studien hinweg gleichbedeutend ist. So ging GOULD, davon aus, dass Erreichbarkeit zwar ein häufig gebrauchter Be-

---

<sup>4</sup> Modal Split steht für die Verkehrsmittelwahl bzw. Verkehrsmittelbenutzung. Er ist die Kenngröße zur Aufteilung der Verkehrs auf verschiedene Verkehrsmittel. Im Personenverkehr bezeichnet man Verhältnis zwischen motorisiertem Individualverkehr (MIV) und öffentlichem Verkehr (ÖV) als klassischen Modal Split. Allerdings hat erst die Einbeziehung von Zufußgehen und Fahrradfahren (als Formen Individueller Mobilität IV) die Voraussetzung für stadt- bzw. umweltverträgliche Verkehrskonzepte geschaffen. Die Verkehrsmittelwahl im Personenverkehr unterliegt dabei stark psychologisch-sozialen Faktoren (BRUNOTTE et al. 2002).

<sup>5</sup> TOD = Transit Oriented Development (Definition siehe Annex)

griff, der aber schwerlich eindeutig zu definieren sei. „Accessibility [...] is a slippery notion [...] one of those common terms that everyone uses until faced with the problem of defining and measuring it” (GOULD 1969). Auch in der einschlägigen Literatur (Lehrbücher) ist die Definition nicht deckungsgleich. Der Vergleich mehrerer Definitionen zeigt, dass nur zwei Indikatoren bei acht aufgeführten Übereinstimmungsmöglichkeiten von allen Autoren genannt werden. Zudem zeigt sich hier bereits, dass die Bezeichnung dieser Indikatoren keinem einheitlichen Schema folgt. Übereinstimmungen ergeben sich in den Bezeichnungen für räumliche Lage und Interaktionsmöglichkeiten. Diese beiden Indikatoren von Erreichbarkeit zeigen an, inwieweit Zugang zu Ressourcen bzw. Gelegenheiten an einem Ort bestehen, und welche Aktivitäten von dort aus erreicht werden können. Alle darüber hinausgehenden Indikatoren werden nicht von allen Autoren als Erreichbarkeit definierende Attribute angesehen. Während z.B. NUHN und HESSE auch davon ausgehen, dass soziodemographische Faktoren (wie Bildung oder Einkommen) eine Rolle spielen, werden diese bei den anderen nicht explizit genannt, was verwundert, da ja bereits der Begriff Mobilität eine solche Komponente (geistige Beweglichkeit) enthält (NUHN & HESSE 2006). BRUNOTTE sowie KNOX und MARSTON hingegen sehen die Qualität des Verkehrsnetzes als einen entscheidenden Faktor bei der Bestimmung von Erreichbarkeit an (BRUNOTTE et al. 2002, KNOX & MARSTON 2001). Dass dabei auch die Überwindung von Raum- bzw. Zeiteinheiten eine gewisse Bedeutung hat, erwähnen aber nur HESSE und NUHN (NUHN & HESSE 2006) sowie BRUNOTTE (BRUNOTTE ET AL. 2002). Letzterer ist auch der Einzige, der auf die Bedeutung der Raumstruktur eingeht sowie die Bereitstellung von Verkehrsmitteln als Erreichbarkeitskriterium nennt. KNOX und MARSTON sind die Einzigen, die die Einschätzungen von handelnden Personen über die Nähe bzw. Distanz von Einrichtungen sowie die Lebensumstände Einzelner als begrenzende Faktoren von Erreichbarkeit einbeziehen (KNOX & MARSTON 2001).

Zu beachten ist, dass Erreichbarkeit nicht mit Reichweite gleichzusetzen ist. Reichweite als Maß gibt an, wie viel Distanz oder Raum in einer gewissen Zeit überbrückt werden kann. Erreichbarkeit hingegen zeigt an, wie viele Ziele innerhalb einer gewissen Zeit oder Distanzeinheit erreicht werden können. Eine größere Reichweite (als Maß der Flächendimension) führt daher nicht zwangsläufig zu einer größeren Erreichbarkeit, die den Flächeninhalt genauer beschreibt (KNOFLACHER 2007). Gänzlich unbeachtet bleibt die bereits in der Einleitung angesprochene Vulnerabilität von Verkehrsnetzwerken. Je nach Ausmaß eines Vorfalls (Naturgefahr oder terroristischer Anschlag) kann sich die Verfügbarkeit von Transportwegen und- mitteln als schwierig erweisen. Die Möglichkeit, Ziele zu erreichen oder

Aktivitäten durch zu führen, ist stark eingeschränkt (CATS & JENELIUS 2012, LATORA & MARCHIORI 2005, RODRÍGUEZ-NÚÑEZ & GARCÍA-PALOMARES 2014).

Übersicht Definitionen Erreichbarkeit:

<i>Erreichbarkeit beschreibt: (eigene Klassifizierung)</i>	<b>Nuhn und Hesse (NUHN &amp; HESSE 2006)</b>	<b>Brunotte (BRUNOTTE et al. 2002)</b>	<b>Knox und Marston (KNOX &amp; MARSTON 2001)</b>
<i>1 Aktivitätspotential am Standort</i>	Zugang zu Ressourcen bzw. Gelegenheiten	Maß der Lagequalität	Nähe als Zeichen des Standortnutzens
<i>2 Potentielles Aktivitätspotential bei Ortsverlagerung</i>	Zahl von potentiellen Gelegenheiten in Raumeinheit je Zeiteinheit	Kontakt- und Aktivitätspotential / Standortvorteil	Relativer Standort: Möglichkeit zu Kontakt und Interaktion
<i>3 Maß für Raum- bzw. Zeiteinheiten</i>	Abhängigkeit von Raum und Zeitwiderständen	Maß: Distanz- bzw. Reisezeit oder komplexere Indikatoren	
<i>4 Konnektivität</i>		Abhängig von Art und Umfang der Verkehrserschließung	Qualität des Netzwerks (Transport, Telekommunikation)
<i>5 Raumstruktur</i>		Abhängig von Siedlungs- und Raumstruktur	
<i>6 faktische Verfügbarkeit</i>		Bereitstellung von Verkehrsmitteln	
<i>7 soziodemographische Verfügbarkeit</i>	Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln (soziodemographische Faktoren)		
<i>8 Entscheidungskriterium</i>			Nähe bzw. Distanz als Entscheidungskriterium

Diese knappe Zusammenstellung zeigt bereits, dass das Konzept der Erreichbarkeit schwerlich eindeutig zu definieren ist. Allerdings zeigt sich, dass die räumliche Komponente eine große Rolle spielt. Die Begriffe Nähe, Lagequalität, Standortnutzen, Raum- und Siedlungsstruktur sowie Distanz belegen die Annahme, dass Verkehrsnetze geographisch untersucht werden können. Im nächsten Schritt wird erläutert, wie Verkehrsnetze wissenschaftlich beschrieben werden können.



## 6 ERKLÄRUNGSANSÄTZE FÜR VERKEHRSNETZE

### 6.1 UNTERSCHIED ZWISCHEN ÖPNV- UND STRASSEN-NETZEN

Bevor die möglichen Repräsentationen und wissenschaftliche Erkenntnisse über Verkehrsnetzwerke diskutiert werden, soll hier kurz auf die wesentlichen Unterschiede zwischen Straßennetzen und PTN eingegangen werden. Während Straßen dem Nutzer praktisch 24 Stunden am Tag bereit stehen, sind Fahrgäste des ÖPNV an das ihnen vorhandene Angebot gebunden. Der Fahrplan, also auch die Betriebsruhe, und das Raumangebot (meist in Sitzplatzkilometern gemessen) richten sich dabei am Bedarf aus. Das heißt, dass dem Fahrgast vor allem an den Wochenenden und nachts ein geringeres Angebot unterbreitet wird, im Berufsverkehr hingegen herrscht meist das dichteste sowohl Takt- als auch Raumangebot. Zudem ist die Nutzung des ÖPNV auch zumeist mit anderen Zwängen versehen. So sind die meisten Ziele innerhalb einer Agglomeration nur durch (mehrmaliges) Umsteigen zu erreichen. Daher ist der Fahrgast darauf angewiesen, dass überhaupt akzeptable Umsteige-Verbindungen bestehen. Fehlende Anschlüsse, Anschlüsse mit langen Fahrzeugwechselzeiten oder der Zwang zu mehrmaligem Umsteigen, führen dazu, dass nur noch



diejenigen Personen den ÖPNV nutzen, die keine andere Möglichkeit besitzen (captive riders). Bestehen Verbindungen, so ist der Fahrgast darauf angewiesen, dass der Fahrplan eingehalten wird, um Umsteigevorgänge zu ermöglichen. Die Betriebsstabilität und Verlässlichkeit sind folglich wichtige Bestandteile eines PTN. Zu guter Letzt sind Nutzer des ÖPNV gezwungen, die Zugangspunkte des Nahverkehrsangebots zu erreichen. Das heißt, dass die Zugangspunkte

zumeist fußläufig erreichbar sein müssen, um vom Fahrgast angenommen zu werden. Die beste Verbindung bringt nichts, wenn der Nutzer diese nicht erreichen kann.

Eine für den Fahrgast weniger wichtige, für die Darstellung aber entscheidende Eigenheit von PTN ist die Nutzung von Linien. Verbindungen zwischen zwei Endknoten ent-

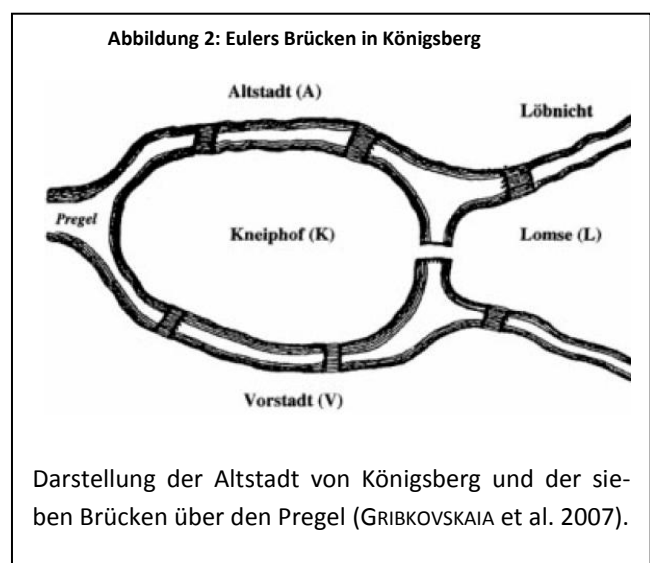
lang eines stets verbunden Pfades, werden als Linien bezeichnet. Dabei zeigen Nahverkehrssysteme teilweise das Phänomen der Linienüberlagerung. Das heißt, dass ein direkt benachbartes Linienpaar von mehr als einer Linie bedient wird (PAULLEY et al. 2006, FERBER et al. 2007, LEI & CHURCH 2010, CATS & JENELIUS 2012, JÄPPINEN et al. 2013, RODRÍGUEZ-NÚÑEZ & GARCÍA-PALOMARES 2014).

## 6.2 GRAPHENTHEORIE ALS ERLÄRUNGSANSATZ FÜR NETZWERKSTRUKTUREN

### 6.2.1 ENTSTEHUNG DER GRAPHENTHEORIE

Bereits in der Antike fand das planvolle Anlegen von Straßen, auch in Städten, Anwendung. Nachdem die Kunst des römischen Straßenbaus im Mittelalter verloren gegangen war, kam erst ab Mitte des 18. Jahrhunderts wieder das Bedürfnis nach gut ausgebauten Verkehrswegen auf. Die Erfindung der Eisenbahn, die einsetzende Industrielle Revolution und die damit einhergehende Urbanisierung führen dazu, dass erstmals neben nationalen/regionalen Linien auch urbane Netzwerke geplant werden. Auch wenn die Systeme Eisen-, Schnell-, Trambahn und Bus ihre dominierende Rolle im Modal Split verloren haben, so sind sie doch im urbanen Kontext nicht wegzudenken. Öffentliche Nahverkehrsnetzwerke sind dabei physisch vorhandene Netzwerke, deren Topologie bzw. Geometrie in der Literatur wenig Betrachtung finden. Im Folgenden wird zuerst eine kurzer Abriss zur Geschichte der Graphentheorie und im Anschluss eine Übersicht über aktuelle Studien zu Verkehr und PTN gegeben (NIGGEMANN 2012, DERRIBLE & KENNEDY 2011).

Die Anfänge der Graphentheorie stammen aus Königsberg. *Leonhard Euler* untersuchte 1735, ob es möglich sei, die sieben Brücken über den Fluss Pregel so zu überqueren, dass dabei jede jeweils nur einmal überquert wird. Zur Lösung des Problems zeichnete Euler einen ungerichteten Graphen mit vier Knoten (Altstadt-Löbnicht, Vorstadt, Kneiphof und Lomse). Die Kanten entsprechen demnach den sieben Brücken. Um zu einer Lösung zu kommen, muss ein ungerichteter



Graph zusammenhängend sein und jeder seiner Knoten einen geraden Grad besitzen. Für den vorliegenden Fall hieße dies, dass jeder Stadtteil von einer geraden Zahl von Brückenköpfen erreicht werden müsste; diese Voraussetzung ist im vorliegenden Fall aber nicht erfüllt. Der Stadtteil Kneiphof wird von fünf, die restlichen von jeweils drei Brücken erreicht. Das erste bekannte Routing-Problem kann also nicht gelöst werden. Allerdings wird sich die Graphentheorie als wichtiges Instrument beweisen (ALEXANDERSON 2006, FELSNER o.A.).

DERRIBLE und KENNEDY nennen als nächste wichtige Beiträge die Arbeiten von CAYLEY aus den 1880-1890er Jahren und die des Mathematikers *Berge* aus den 1960er Jahren (DERRIBLE & KENNEDY 2011). Letzterer nutze die zyklomatische Zahl zur Berechnung der Anzahl von Kreisen in einem Graphen. Die Berechnung erfolgt anhand folgender Formel:

$$\mu = e - (v - p) = e - v + p$$

wobei  $e$  gleich der Anzahl der Kanten (edges),  $v$  gleich der der Knoten (vertices) und  $p$  die Anzahl der Teilgraphen ist. Da Verkehrsnetzwerke selten unverbunden sind, gleicht  $p$  oft eins. Weiter gilt: „[e]ssentially,  $(v - 1)$  is the number of edges in a tree graph with  $v$  vertices. Therefore, subtracting  $(v - 1)$  to  $e$  simply counts the numbers of 'extra-edges' in the graph, and it is these 'extra-edges' that create cycles“ (DERRIBLE & KENNEDY 2011). Kreise sind für Verkehrsnetzwerke von besonderer Bedeutung, da sie alternative Verbindungen anzeigen können.

## 6.2.2 GRAPHENTHEORIE IM VERKEHRBEREICH

Die ersten Anwendungen der Graphentheorie auf Verkehrsnetze beschränkten sich auf das Straßensystem. Zudem lagen dem Einsatz vor allem ökonomische und keine strukturellen Überlegungen zu Grunde. So wurde zum Beispiel das amerikanische Highway System auf seine regionalwirtschaftlichen Auswirkungen hin untersucht. Erst Anfang der 1960er Jahre rückte Netzgestaltung in den Fokus. Die Studien von GARRISON und MARBLE aus den Jahren 1962, 1964 und 1965 (GARRISON & MARBLE 1962, GARRISON & MARBLE 1964, GARRISON & MARBLE 1965) führten zur Messung der Netzausgestaltung drei Indikatoren ein (DERRIBLE & KENNEDY 2011). Der erste Indikator misst den Grad der Zyklizität eines Netzwerks, also das Verhältnis potentieller zu tatsächlicher Kreise innerhalb eines Netzwerks. Dabei gehen GARRISON und MARBLE von folgender Formel aus:

$$\alpha = \frac{e - v + 1}{\frac{1}{2}v(v - 1) - v - 1}$$

Im Zähler steht hierbei die zyklomatische Zahl  $\mu$  (siehe vorheriger Absatz) und im Nenner die größtmögliche zyklomatische Zahl. Da Netzwerke aber meist planar, also zwei- statt dreidimensional, sind, führt dies dazu, dass an Kreuzungspunkten von Linien zumeist Umsteigeknoten gebildet werden. Die Formel ändert sich daher, weil für planare Netzwerke die maximale Anzahl von Kanten nicht wie oben definiert ist, sondern als  $3(v - 2)$ , wie folgt:

$$\alpha = \frac{e - v + 1}{3(v - 2) - v - 1} = \frac{e - v + 1}{2v - 5}$$

Der zweite Indikator, der  $\gamma$ Index untersucht das Verhältnis zwischen der Anzahl tatsächlich und potentiell vorhandener Kanten in einem Netzwerk. Er gibt den Grad der Konnektivität an und berechnet sich mit der folgenden Formel (diesmal gleich die planare Version, analog zur zweiten Formel der vorherigen Indikatoren  $\alpha$ ).

$$\gamma = \frac{e}{3(v - 2)} = \frac{e}{3v - 6}$$

Der letzte Indikator bemisst die Verteilung von Kanten zu Knoten und zeigt damit die durchschnittliche Anzahl an Verbindungen eines Knoten. Je mehr Verbindungen ein Knoten besitzt, desto komplexer ist das Netzwerk. Daher wird dieser Indikator auch als Komplexität bezeichnet.

$$\beta = \frac{e}{v}$$

Diese ersten Indikatoren erlauben eine erste Einschätzung von Verkehrsnetzen und ihren Eigenheiten. Sie tauchen immer wieder in der Literatur zu Netzwerken auf und werden auch in neueren Studien noch immer verwendet (DERRIBLE & KENNEDY 2011).

Aber nicht nur GARRISON und MARBLE beschäftigten sich in dieser Zeit mit Verkehrsnetzen, auch andere entwickelten ihre Indikatoren auf Grundlage der Graphentheorie. Beispielhaft sollen hier noch die Indikatoren von KANSKY (KANSKY 1963) kurz skizziert werden. Er führte die folgenden vier Indikatoren ein:

Durchschnittliche Kantenlänge	$\eta = \frac{R}{e}$	$R \triangleq$ der gesamten Netzlänge und $e \triangleq$ der Anzahl aller Kanten des Netzwerks
-------------------------------	----------------------	--

Kreisumfang	$\pi = \frac{R}{d}$	$R \triangleq$ der gesamten Netzlänge und $d \triangleq$ dem längsten Kürzesten-Pfad der am weitesten voneinander entfernt liegenden Knoten entlang der Netzwerkkanten
Verkehrsfluss	$\theta = \frac{T}{v}$	$T \triangleq$ dem gesamten Verkehrsfluss (zumeist Gesamtzahl Passagiere) und $v \triangleq$ der Anzahl aller Knoten
Alternativ-Indikator (falls Passagierdaten fehlen)	$\tau = \frac{R}{\omega}$	$R \triangleq$ der gesamten Netzlänge und $\omega \triangleq$ der Anzahl aller Knoten, die nach ihrer Funktion im Netzwerk gewichtet wurden

KANSKY geht auf die Eigenheiten von Verkehrsnetzen ein. So spielen die Gesamtlänge des Systems, der Verkehrsfluss und auch die Umsteigefunktion von Knoten eine Rolle. Der Kreisumfang als Indikator zeigt an, wie ausgedehnt ein Netz ist. Aus Fahrgastsicht ist dabei ein Netzwerk mit hoher Gesamtlänge und geringem Durchmesser von Vorteil, da es sehr wahrscheinlich kurze Fahrzeiten bieten kann, indem es viele Ziele in kurzer Entfernung zueinander verbindet. Der Verkehrsfluss berechnet, wie stark die Knoten durchschnittlich belastet sind, vernachlässigt allerdings die Bedeutung von Umsteigeknoten bzw. Aufkommensschwerpunkten. Diese sind im Alternativ-Indikator eingearbeitet (DERRIBLE & KENNEDY 2011). Seit Mitte der 2000er Jahre scheinen auf der Graphentheorie fußende Studien zu verschiedenen Aspekten von Verkehrsnetzen wieder zuzunehmen. Exemplarisch seien hier die Arbeiten von SCOTT, FERBER und PARTHASARATHI, HOCHMAIR und LEVINSON genannt (SCOTT et al. 2006, FERBER et al. 2007, PARTHASARATHI et al. 2012).

Die Anfänge der Anwendung von Graphentheorie auf Verkehrsnetze betrachteten fast ausschließlich Straßensysteme. Erst in den 1980er und 1990er Jahren rückten vermehrt ÖPNV-Netzwerke in den Blickwinkel. DERRIBLE und KENNEDY (DERRIBLE & KENNEDY 2011) machen dies an der Problematik fest, dass die meisten PTN aus verschiedenen Verkehrsmitteln (Schnellbahnen, Trambahnen, Busse) bestehen und erst die Frage gelöst werden musste, wie die Kanten dieser miteinander verglichen werden können. Zudem spielen beim Öffentlichen Nahverkehr auch Faktoren wie die Minimierung von Umstiegen oder Fahrzeit und die Verlässlichkeit eine Rolle, die beim Straßenverkehr vernachlässigt werden können. Die bestehenden Indikatoren müssen also an diese und die Eigenheit von ÖV-Systemen, in (sich

auch überlagernden) Linien organisiert zu sein, angepasst werden. Zum Teil müssen zudem passende Indikatoren erst entwickelt werden.

Laut DERRIBLE und KENNEDY (DERRIBLE & KENNEDY 2011) findet sich die erste Anwendung von Graphentheorie auf ÖV-Systeme beim LAM und SCHULER in den Jahren 1981 und 1982. Neben den Indikatoren von GARRISON und MARBLE entwickeln LAM und SCHULER eigene. Konnektivität definieren sie als den Vergleich zwischen der idealen Fahrzeit zwischen zwei Knoten in einem komplett vernetzten Netzwerk und der tatsächlichen Fahrzeit entlang bestehender Kanten<sup>6</sup>. Je weniger Diskrepanz zwischen den beiden Fahrzeiten liegt, desto besser ist die Struktur des Nahverkehrsnetzes. Problematisch an diesem Vorgehen ist die große benötigte Datenmenge über Betriebszustände, die nicht in jedem Fall vorhanden bzw. beschaffbar sind.

Weitergehende Annäherungen an die Eigenheiten sind dann bei den Arbeiten von

<u>Netzgröße und Netzform</u>	<u>Topologie</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anzahl Stationen einer Linie</li> <li>- Anzahl der Abstände zwischen Stationen einer Linie</li> <li>- Länge einer Linie</li> <li>- Anzahl Umsteigeknoten</li> <li>- Anzahl Linien eines Netzwerks</li> <li>- Anzahl Stationen</li> <li>- Anzahl aller Abstände zwischen Stationen</li> <li>- Gesamtlänge des Netzwerks</li> <li>- Anzahl Kreise</li> <li>- Anzahl aller Fahrtmöglichkeiten zwischen allen Stationen (sortiert nach gesamt, direkt und mit Umstieg)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Existenz von Kreisen</b></li> <li>- <b>Netz-Komplexität</b></li> <li>- <b>Netz-Konnektivität</b></li>   <li>- <b>Durchschnittlicher Abstand zwischen Stationen</b></li> <li>- <b>Überlagerung von Linien</b></li> <li>- <b>Direktheit</b></li> </ul>

MUSSO und VUCHIC zu erkennen (MUSO & VUCHIC 1988, VUCHIC 2005). Sie teilen die Eigenschaften von Nahverkehrsnetzen in zwei Gruppen auf, Netzgröße bzw. –form sowie Topologie. Die Darstellung zeigt die Messgrößen. Die

<sup>6</sup> Es erfolgt zuerst die Berechnung der Idealzeit für jede Fahrt  $i$  aus allen möglichen Fahrten  $n$  anhand von  $\bar{T} = \frac{1}{\frac{1}{n}(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \dots + \frac{1}{T_n})} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_i \frac{1}{T_i}}$ , diese wird dann mit der errechneten Realfahrzeit

$\bar{t} = \frac{1}{\frac{1}{n}(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \dots + \frac{1}{t_n})} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_i \frac{1}{t_i}}$ , anhand der Formel  $R_T = \frac{\bar{T}}{\bar{t}}$  verglichen. Da der theoretische Wert meist niedriger als der reale Wert ist, ergeben sich Werte zwischen 0 und 1. Wobei aus Sicht des Fahrgast Werte nahe 1 (die reale Fahrzeit nähert sich der idealen Fahrzeit an) zu bevorzugen sind.

Indikatoren für Größe und Form sind relativ einfach beschreibbar und bedürfen keiner weiteren Erklärung. Bei den Topologie-Indikatoren fällt auf, dass die blau gefärbten, dem Vorschlag von GARRISON und MARBLE und ihrer Terminologie folgen. Die drei orangenen Messgrößen hingegen sind von MUSSO und VUCHIC auf öffentliche Verkehrsnetze ausgerichtet worden. Diese werden im Folgenden genauer betrachtet, da sie eingehendere Erkenntnisse über Nahverkehrsnetze erlauben. So erklärt der durchschnittliche Abstand zwischen Stationen, ob ein Netz eher kleinräumige Erreichbarkeit oder großräumiges, schnelles Vorkommen bietet. Je kürzer der Abstand  $S$  ist, desto langsamer ist die Reisegeschwindigkeit, allerdings liegen die Stationen näher aneinander, womit die Erschließungsqualität steigt. Der Indikator  $\lambda$  berechnet anhand des Vergleichs der Gesamtlänge aller Linien mit der Gesamtlänge des Netzes die Überlappung von Linien. Dieser Indikator zeigt damit auf, in welchem Umfang im gesamten Netz Restriktionen bestehen. Sofern ein Stück des Schienennetzes von mehr als einer Linie belegt werden, muss bei der Erstellung des Fahrplans darauf Rücksicht genommen werden, da eine Trasse nicht gleichzeitig von Zügen zweier Linien belegt werden kann<sup>7</sup>. Als letzter von MUSSO und VUCHIC eingeführter Indikator bemisst die Direktheit, das Verhältnis aller umsteigefreien Verbindungen zu allen potentiellen Fahrtmöglichkeiten<sup>8</sup> (VUCHIC 2005, MUSSO & VUCHIC 1988, DERRIBLE & KENNEDY 2011).

## 6.3 WEITERENTWICKLUNG DER GRAPHENTHEORIE

### 6.3.1 SMALL-WORLD UND SCALE-FREE-NETZWERKE

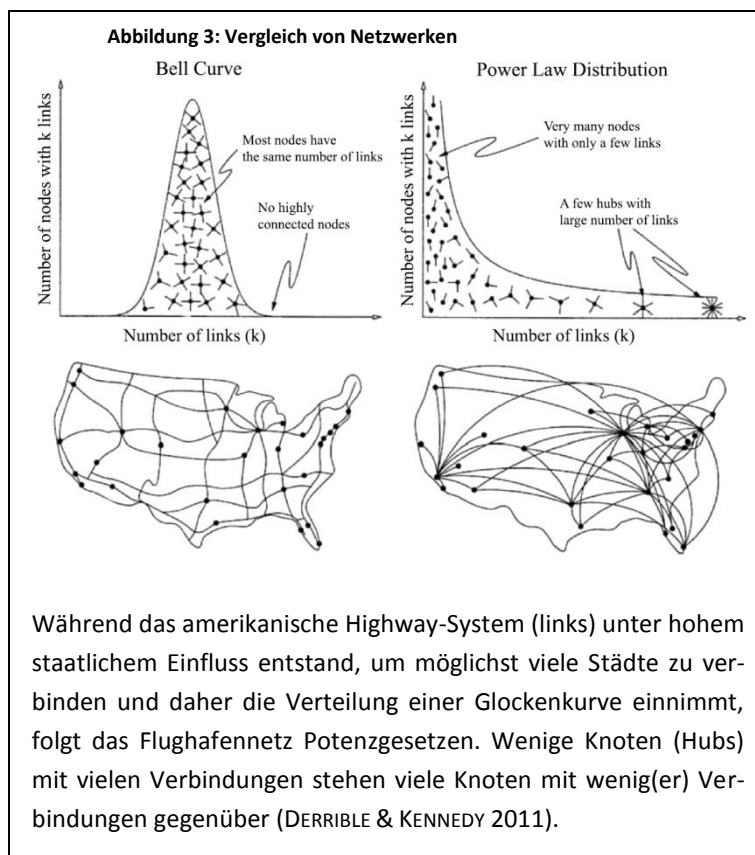
Kurz vor der Jahrtausendwende kam es zu bedeutenden Weiterentwicklungen. WATTS und STROGATZ stellten ihr Konzept der small-world-Netzwerke, die weder vollkommen regelmäßig noch willkürlich ausgestaltet sind, vor. Sie gingen davon aus, dass es Netzwerke gibt, deren Eigenheit auf der starken Häufung (clustering) von Knoten und kurzer durchschnittlicher Kantenlängen beruht. Das heißt, dass ein willkürlich gewählter Zielknoten, trotz der Größe des Netzes, über wenige Knoten zu erreichen ist. Die Ermittlung der Knotenballung  $C$  erfolgt über den Zwischenschritt der Berechnung des clustering-

<sup>7</sup> Diese Problematik ist bei Nahverkehrssystemen die keine spurgebundenen Verkehrsmittel (U-Bahn, Tram) einsetzen nicht gegeben. Die Einteilung in Blockabschnitte und Signalisierung fällt hier weg.

<sup>8</sup>  $\frac{1}{2}v(v-1)$ , sofern alle Stationen als Knoten betrachtet werden

Koeffizienten<sup>9</sup> anhand der Formel:  $C = \frac{1}{v} \sum_i C_i$ . Die kürzesten Abstände aller bestehenden Knotenpaare dienen als Grundlage für die Berechnung der durchschnittlichen kürzesten Kantenlänge  $L$ . Aus Sicht von WATTS und STROGATZ zeichnen sich small-world-Netzwerke dadurch aus, dass die kürzeste Pfadlänge kürzer als der natürliche Logarithmus aller Knoten ist. Zudem lässt sich überprüfen, ob ein Netzwerk small-world-Eigenheiten besitzt, indem sowohl die Werte von  $C$  und  $L$  mit willkürlich ausgewählten Netzwerken mit gleicher Anzahl von Knoten und Kanten und deren Werte für diese Indikatoren verglichen werden (LATORA & MARCHIORI 2002, NEWMAN 2003, DERRIBLE & KENNEDY 2010b, LIN & BAN 2013)

Bei der Betrachtung von Netzwerken, unter anderem des Internets und des amerika-



nischen Stromnetzes, fiel BARABÁSI und ALBERT (BARABÁSI & ALBERT 1999) auf, dass einige skalenfrei sind. Diese Netze neigen dazu, dass bei einer Erweiterung die besser vernetzten Knoten präferiert werden (preferential attachment). Demnach besitzen diese Netzwerke die charakteristischen Eigenheiten von gewöhnlichen Verteilungen, wie arithmetisches Mittel und Standardabweichung nicht.

Diese Netzwerke gelten als robust, allerdings kann der Ausfall besonders gut vernetzter Knoten drastische Auswirkungen haben (DERRIBLE & KENNEDY 2010b, DERRIBLE & KENNEDY 2011, LIN & BAN 2013). Laut DERRIBLE und KENNEDY (DERRIBLE & KENNEDY 2011) gehören meist die Verkehrsnetze dazu, die sich am Passagieraufkommen orientieren und nicht gänzlich durch staatlichen Eingriff beeinflusst werden. Allerdings werden diese neuen Er-

<sup>9</sup>  $C_i = \frac{e_i}{e_i^{max}} = \frac{2e_i}{k_i(k_i-1)}$  wobei  $e_i$  die Anzahl der bestehenden Kanten im Cluster des Knoten  $v_i$  der mit  $k_i$  Knoten (von  $v_i$  ausgehenden Kanten verbundene Knoten) verbunden ist, und  $e^{max}$  die Anzahl aller potentiellen Kanten ist.



kenntnisse der Graphentheorie laut DERRIBLE und KENNEDY (DERRIBLE & KENNEDY 2011) bisher wenig angewendet. Das liegt daran, dass einige der Eigenheiten von Verkehrsnetzen keine Beachtung finden. So kritisieren einige Autoren, dass die Netzwerke als ungerichtet und ungewichtet betrachtet werden. Zudem zeichnen sich öffentliche Nahverkehrsnetze dadurch aus, dass die Zahl von Knoten und Kanten zumeist relativ ausgeglichen und überschaubar bleibt, während hingegen andere komplexe Netzwerke eine deutlich höhere Zahl beider und vor allem eine deutlich größere Anzahl von Kanten im Vergleich zu Knoten besitzen (DERRIBLE & KENNEDY 2011, LATORA & MARCHIORI 2001, SEATON & HACKETT 2004).

Von dieser Kritik ausgehend, entwickeln LATORA und MARCHIORI die Berechnungsmethode weiter. Sie setzen bei ihren Berechnungen die Umkehrfunktion der kürzesten Pfadlänge ein. Ihre Indikatoren beschreiben zwei Aspekte des Systems.  $E_{glob}$  ersetzt  $L$  als beschreibende Instanz des Gesamtsystems und beschreibt die Effizienz des Gesamtsystems. Über die lokale Effizienz, also auf der Stationsebene, erlaubt  $E_{loc}$  Aussagen. Die Berechnung von  $E$  erfolgt anhand folgender Formel:

$$E = \frac{1}{v(v-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$$

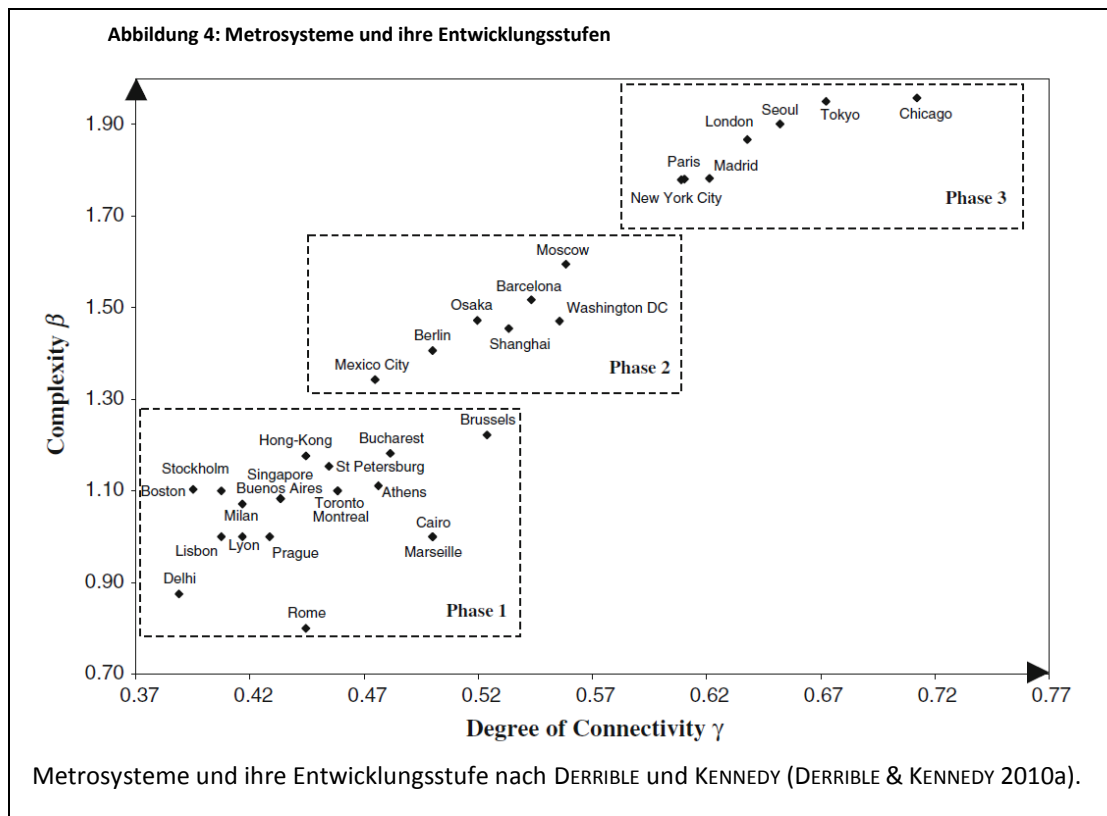
Dabei ist  $v$  die Anzahl aller Knoten und  $d_{ij}$  die Länge des kürzesten Pfads zwischen  $i$  und  $j$  (DERRIBLE und KENNEDY, 2011, LATORA und MARCHIORI, 2001). Mit diesem angepassten Indikator haben LATORA und MARCHIORI (2002) gezeigt, dass das Metrosystems Bostons small-world-Charakteristiken besitzt. Auch andere Untersuchungen kommen zu dieser Erkenntnis (SEATON & HACKETT 2004, VRAGOVIĆ et al. 2005)

### 6.3.2 GRAPHENTHORETISCHE BETRACHTUNG VON DERRIBLE UND KENNEDY

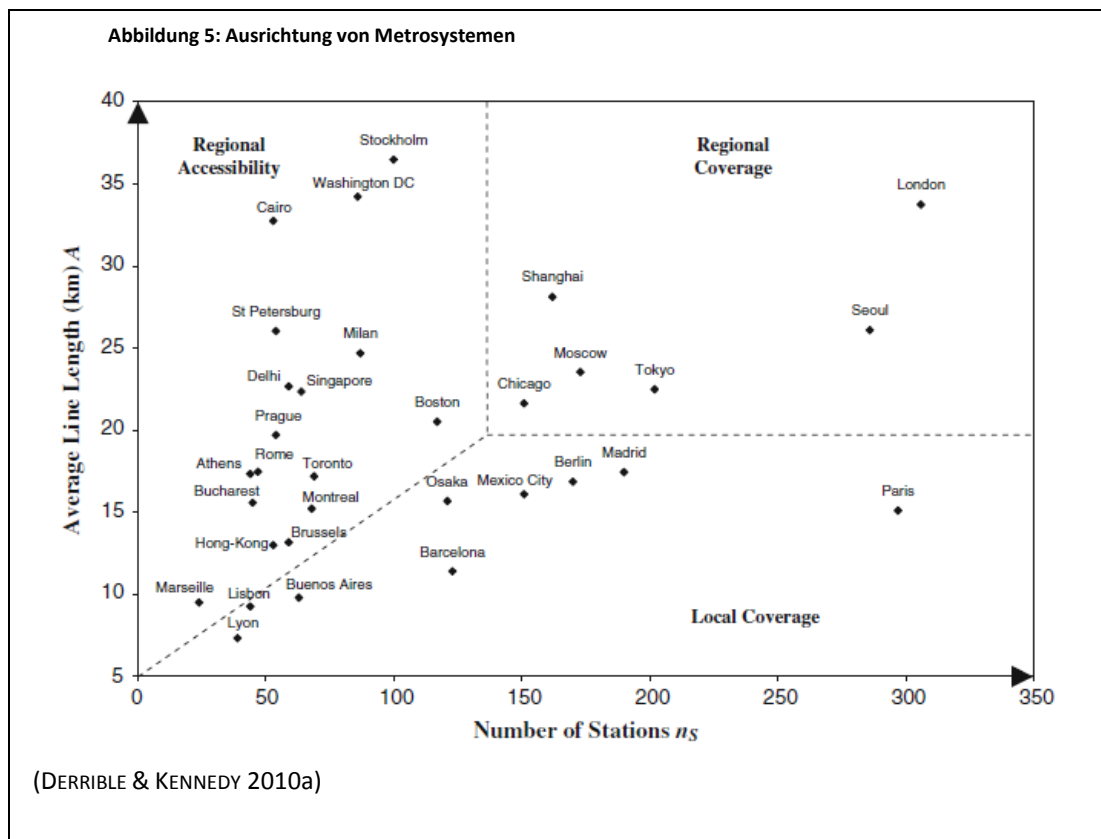
Aus ihrer Erfahrung mit der graphentheoretischen Betrachtung von Netzwerken heraus entwickeln DERRIBLE und KENNEDY ihre Indikatoren, die sie dann auf 33 Metro-Systeme weltweit anwenden. Sie schlagen vor, Netze anhand der Indikatoren **state**, **form** und **structure** zu klassifizieren. **State** beschreibt dabei den zum Betrachtungszeitpunkt vorherrschenden Zustand eines Netzes. Zur Ermittlung wie komplex ein Netz bereits ist, greifen sie auf die bereits von GARRISON und MARBLE entwickelten Indikatoren Komplexität  $\beta$  und Grad der Konnektivität  $\gamma$  zurück. Die Anwendung auf 33 U-Bahn-Systeme zeigt, dass Metronetze mit zunehmendem Wachstum ein Verhältnis von einem Knoten zu zwei Kanten entwickeln.

Je weiter fortgeschritten die Entwicklung ist, desto eher nähern sich Netze auch einem Konnektivitätsgrad von 66 Prozent an. Zu Beginn einer Entwicklung besteht zumeist noch ein Verhältnis von 1:1 zwischen Knoten und Kanten, das heißt, dass jeder neue Knoten durch eine neue Kante erschlossen wird. Kommen weitere Linien hinzu, kann es sein, dass Kanten an schon bestehende Knoten anschließen, es besteht also ein 0:2 Verhältnis. Eine 1:3 Rate bildet sich, wenn eine neue eine bestehende Linie kreuzt und ein neuer Umsteigeknoten entsteht. Insgesamt zeigt sich, dass das anfängliche Verhältnis von eins zu eins relativ schnell in Richtung eins zu zwei bewegt. Mit zunehmender Zahl an Linien in einem System steigt sowohl die Komplexität als auch der Grad der Konnektivität. DERRIBLE und KENNEDY nennen drei Phasen in den die Entwicklung abläuft. Dabei steigen  $\beta$  bzw.  $\gamma$  von bis zu 1,3 bzw. 0,5 über bis zu 1,6 bzw. 0,6 auf bis zu 1,96 bzw. 0,7. Die nebenstehende Abbildung zeigt in welcher Phase sich die untersuchten U-Bahn-Systeme befinden (DERRIBLE und KENNEDY, 2010a).

**Form** soll die Rolle erklären, die ein U-Bahn-Netz in einem Untersuchungsgebiet spielt. Dabei stehen sich grundsätzlich zwei verschiedene Strategien gegenüber. Ein Netz



kann entweder das Ziel haben, die regionale oder die lokale Erschließung zu optimieren. Als Indikator dient dabei die durchschnittliche Linienlänge<sup>10</sup>, wobei davon ausgegangen wird, dass größere durchschnittliche Gesamtlängen darauf hindeuten, dass Linien weit in die Region hineinreichen. Zudem spielt der Abstand zwischen den Stationen<sup>11</sup> eine Rolle. Je größer dieser ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um ein auf die regionale Erschließung ausgelegtes Verkehrsnetz handelt. Größere Abstände erlauben kürzere Fahrzeiten bei gleicher Wegstrecke, da häufiges Bremsen und Halten vermieden wird. Auf den ersten Blick zeigt sich dieser Zusammenhang in der Untersuchung von 33 U-Bahn-Systemen weltweit sehr klar. Es gibt einige Städte, die relativ kurze Linien mit dafür auffällig vielen Stationen besitzen (z.B. Paris, Berlin), und solche, die genau das Gegenteil aufweisen (Kairo, Stockholm). Auch bei den Zwischenabständen ergibt sich ein anscheinend deutliches Bild.



<sup>10</sup>  $A = \frac{L}{n_L}$ , wobei die Berechnung der durchschnittliche Linienlänge  $A$  aus der Division der gesamten Netzlänge  $L$  durch die Anzahl der Linien  $n_L$  erfolgt.

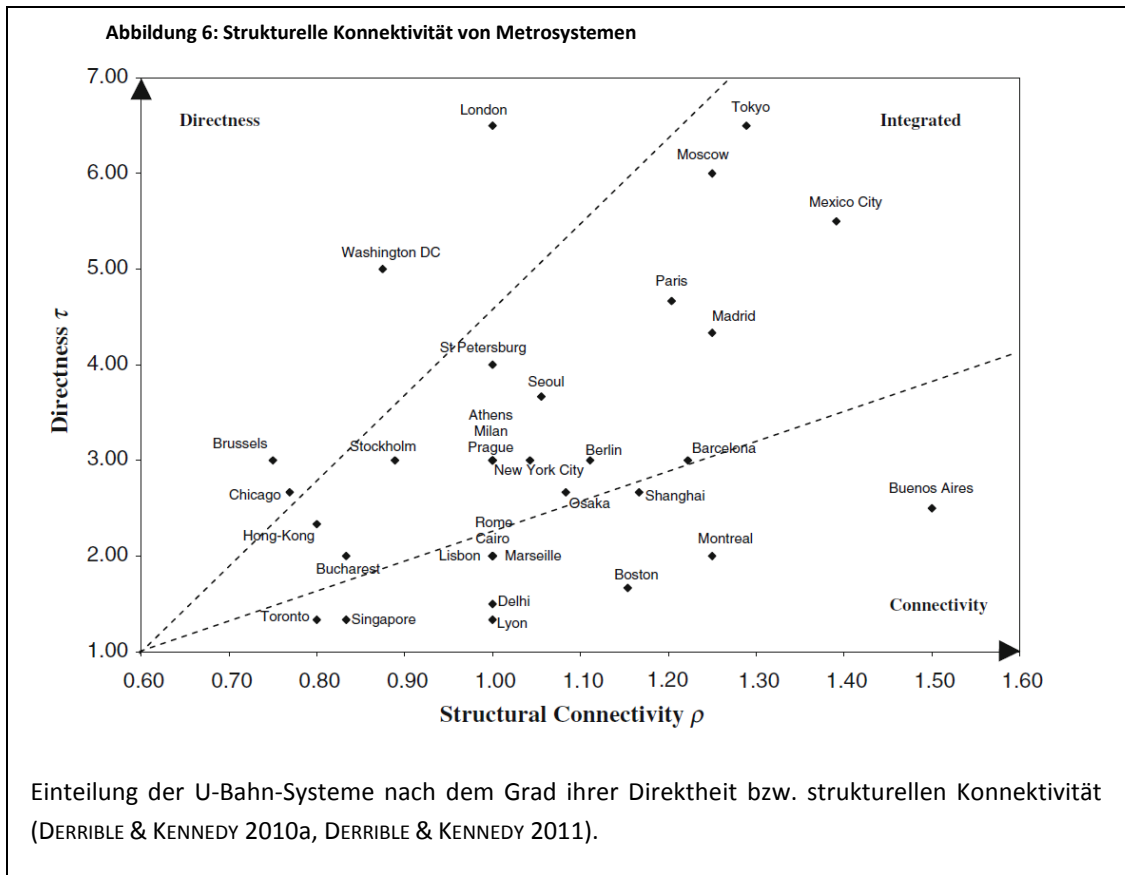
<sup>11</sup>  $S = \frac{L}{n_S}$ , wobei die Berechnung des Stationsabstands  $S$  aus der Division der gesamten Netzlänge  $L$  durch die Anzahl der Stationen  $n_S$  erfolgt.

Während Städte wie Paris oder Barcelona mit geringen Stationsabständen von rund 700 bis 800 Metern die lokale Erschließung als Ziel verfolgen, bieten Washington oder St. Petersburg mit fast zwei Kilometern Stationsabstand eine schnelle Anbindung an die Region (*regional accessibility*). Neben diesen beiden Polen gibt es noch Städte, die versuchen sowohl eine attraktive lokale als auch regionale Erschließung (*regional coverage*) zu gewährleisten. Einschränkend muss erwähnt werden, dass in dieser Untersuchung jedoch die komplementäre Wirkung anderer Verkehrsmittel unberücksichtigt bleibt. So sollen in einigen Städten die regionalen Erschließungswirkungen von S-Bahn-Systemen (z.B. RER in Paris oder S-Bahn in Berlin) erbracht werden und die U-Bahn in diesem Fall eher eine kleinräumige Erschließung garantieren. Indes kann die U-Bahn zum Teil die Funktion von S-Bahn-Systemen in anderen Städten übernehmen, in denen Trambahnen und Busse die Feinerschließung sichern (DERRIBLE & KENNEDY 2010a, DERRIBLE & KENNEDY 2010b).

Während bei **state** der Grad der Konnektivität verglichen wird, handelt sich bei **structure** um die strukturelle Konnektivität. Diese misst das Vorhandensein bzw. die Bedeutung von Verbindungen (Verknüpfungen und Umsteigebeziehungen) innerhalb eines Netzwerks. Dies ist eine Weiterentwicklung der bestehenden Konzepte, da DERRIBLE und KENNEDY hier ihren eigenen Indikator entwickeln, den der Anzahl der Umsteigemöglichkeiten  $v_c^t$ . Dieser misst alle potentiellen Umsteigemöglichkeiten innerhalb des Netzes und ist gleich der der Summe aller Linien weniger einer in einem Umsteigeknoten. Einschränkend muss erwähnt werden, dass dieser Indikator weder standardisiert ist noch beachtet er mögliche Fahrtwegdoppellungen. Trotzdem geht er in den strukturellen Konnektivitäts-Index<sup>12</sup> ein.

---

<sup>12</sup>  $\rho = \frac{v_c^t - e^m}{v^t} = \frac{\sum_i (l-1) * v_{i,j} - \frac{1}{2} (\sum_{ij} (e_{ij} - \frac{e_{ij}}{e_{ij}}))}{\sum_{i,l \neq 1} v_{i,l}}$ , für alle  $e_{ij} \neq 0$ . The numerator calculates the total number of net transfer possibilities; the net value was preferred to avoid false information due to the overlapping line property of metro networks (e.g., northern part of the Circle line for the London Underground). The denominator is used as a means to standardize the indicator; in practise, it actually provides information about the structure of the network itself, which in turn makes the indicator independent of network size; this is a rather valuable property. Another advantage of this indicator is that it emphasizes "hubs" (transfer-stations hosting more than two lines). Indeed, adding one edge between two new vertices will not improve connectivity since the two new transfer-possibilities at the numerator will be offset by the two new transfer-vertices at the denominator. It therefore becomes clearer that  $\rho$  effectively measures a rather structurally focused connectivity (DERRIBLE and KENNEDY, 2010a: 284).



Darüber geht bei der Betrachtung der Netzstruktur auch noch die Direktheit<sup>13</sup> ein. Diese bezieht sich direkt auf die maximale Anzahl von Umsteigevorgängen, wobei beachtet werden muss, dass es sich hierbei um keine feste Größe handelt. Je größer ein Netzwerk desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Ziele nur durch mehrmaliges Umsteigen erreicht werden können. Dies kann, aber muss die Leistung eines Systems nicht schmälern. Allerdings sind Direktheit und strukturelle Konnektivität nicht gänzlich vereinbar. Ein System kann entweder möglichst hohe Direktheit oder hohe strukturelle Konnektivität bieten. Bei der Betrachtung von 33 U-Bahn-Netzen zeigt sich wiederum eine Differenzierung nach regionaler oder lokaler Erschließungsintension. Je mehr an der Direktheit ein Netz orientiert ist, desto wahrscheinlicher zielt es auf die regionale Erschließung ab. Dieser Zusammenhang ist bei der strukturellen Konnektivität weniger ausgeprägt. Eine Ausgeglichenheit zwischen beiden Polen sollte das Ziel sein. Wenn sowohl Direktheit als auch strukturelle Konnektivität beachtet und erreicht werden, sprechen DERRIBLE und KENNEDY von integrierten Netzen (DERRIBLE & KENNEDY 2010a).

<sup>13</sup>  $\tau = \frac{n_L}{\delta}$ , wobei  $\delta$  die maximale Anzahl an Umstiegen auf der längsten möglichen Route im System ist.

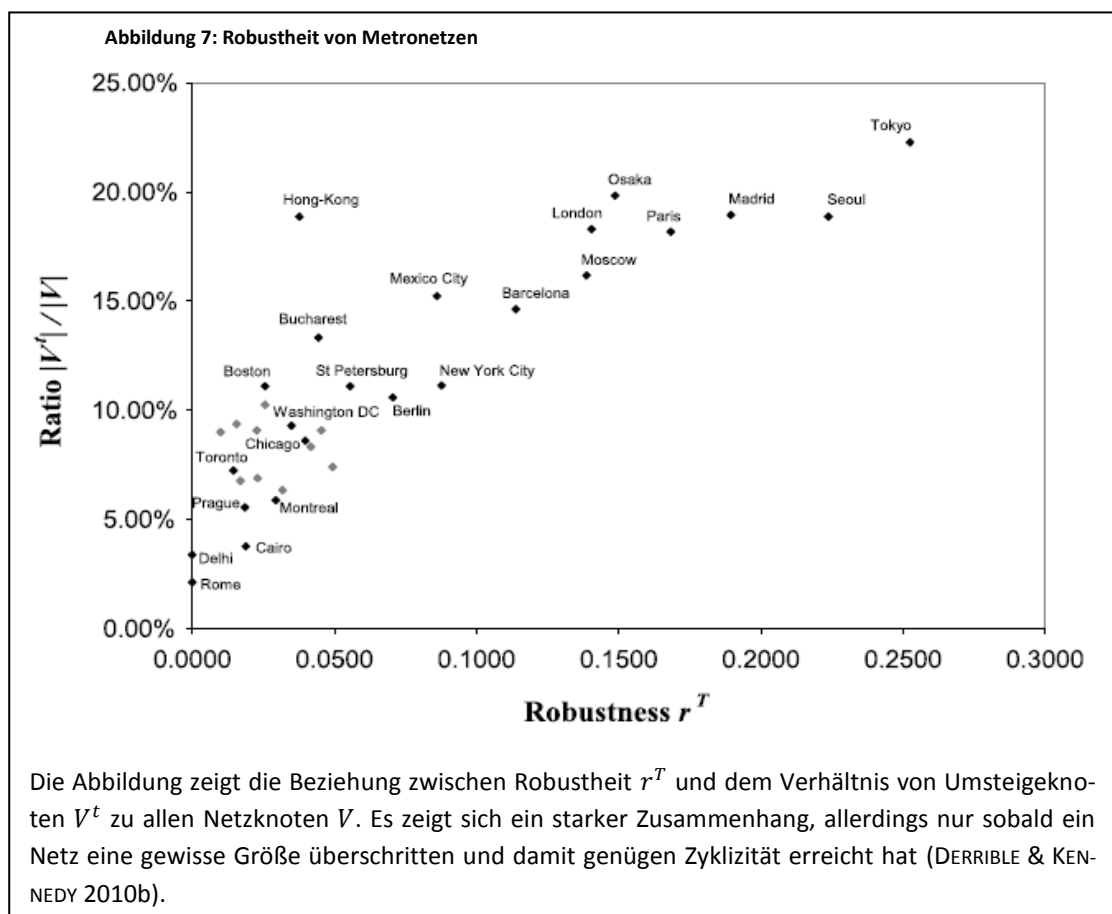
### 6.3.3 VULNERABILITY ANALYSIS

Eine neuere Entwicklung innerhalb der auf der Graphentheorie basierenden Verkehrsforschung ist die Frage nach der Verwundbarkeit von Netzen. Zwar wird nicht erst seit den Terroranschlägen vom 11. September 2001 in New York City, am 11. März 2004 in Madrid und dem 7. Juli 2005 in London die Robustheit von Netzen untersucht, allerdings zeigt sich seitdem ein erhöhtes Interesse an dieser Thematik. Für einen Umweltverband können die Ergebnisse dieser Studien von Belang sein, da sie die kritischen Knoten und Verbindungen in einem System offenbaren. Diese sind nicht nur bei Anschlägen von Interesse, sondern sollten auch bereits bestehende Engpässe oder Überlastungen anzeigen können. Die Einschnitte in das tägliche Leben bei Ausfall von Infrastrukturen wirken nachhaltig. So zeigte sich in London, dass Monate nach den Anschlägen unter der Woche immer noch 15 Prozent und an den Wochenenden sogar 30 Prozent weniger Passagiere den öffentlichen Nahverkehr nutzten (CHEN et al. 2007).

Auch wenn öffentliche Nahverkehrsnetze Ziele von terroristischen Anschlägen geworden sind, so dominieren doch die Studien zur Vulnerabilität von Straßennetzen. Auch LATORA und MARCHIORI beschäftigen sich nur am Rande mit PTN (LATORA & MARCHIORI 2004, PORTA et al. 2006, LATORA & MARCHIORI 2005). Sie greifen bei ihren Studien auf Telekommunikations- und terroristische Netzwerke zurück. Nur ganz kurz behandeln sie das Bostoner U-Bahn-System und zeigen somit, dass ihr Ansatz auch auf Nahverkehrsnetze anwendbar ist. Sie messen die Leistungsfähigkeit  $S$  eines Netzes vor und nach einem Vorfall, um die Ergebnisse beider Berechnungen zu vergleichen.  $S$  wird dabei von der Variablen  $\Phi > 0$  bestimmt. Am Anfang ihrer Vorgehensweise steht die Ermittlung von möglichen Ausfallszenarien (Damage), die dann untersucht werden. Es gilt dabei, dass *Damage*  $D(S, d)$ , wobei  $d \in D$  ist. Die Vulnerabilität als Vergleich der beiden Leistungsfähigkeiten errechnet sich dann wie folgt:  $V[S, D] = \frac{\Phi[S] - W[S, D]}{\Phi[S]}$ . Wobei  $W[S, D] = \Phi[\text{Damage}(S, d^*)]$  die jeweils schlechteste Leistungsfähigkeit eines jeden Vorfalls darstellt. Sie konnten damit den kritischsten Link im Bostoner U-Bahn-System ermitteln. Dieser ist die Verbindung der Stationen Park Street und Boylstone (LATORA & MARCHIORI 2004, LATORA & MARCHIORI 2005).

DERRIBLE und KENNEDY (DERRIBLE & KENNEDY 2010b) hingegen vergleichen nicht die Leistungsfähigkeiten des Gesamtnetzes mit einem betroffenen Netzwerk. Zudem lehnen sie den von anderen Wissenschaftlern vorgeschlagenen Indikator **assortativity** (Gleichordnung) ab. Dieser misst, wie viele Knoten mit einem bestimmten Wert  $b$ , der den Grad der Konnektivität angibt, mit anderen Knoten mit ähnlichen Indexwerten verbunden sind. Es wird ge-

folgt, dass in einem gleichgeordneten Netzwerk, der Ausfall eines Knotens weniger relevant ist, da die Herausnahme in diesem Fall zu keiner nennenswerten Vergrößerung der Pfadlänge führt. DERRIBLE und KENNEDY wenden ein, dass kleinere U-Bahn-Systemen, mit wenigen Umsteigeknoten, von sich aus schon gleichgeordnetere Knoten besitzen. Diese Netze zeichnen sich durch viele Knoten aus, die nur Zugang zu einer Linie und damit eine gleichbleibende Anzahl von Nachbarknoten aufweisen. Größere Systeme hingegen besitzen, aufgrund ihrer größeren Anzahl von Linien, Knoten mit vielen verschiedenen Konnektivitätswerten. Daher sind diese durch ihre höhere Zahl von Linien und Umsteigeknoten in der Lage, mehr alternative Fahrtwege zu bieten. Diesen Zusammenhang sehen DERRIBLE und KENNEDY als ausschlaggebend für die Verwundbarkeit bzw. Robustheit eines Systems an und nicht die Gleichordnung. Als Indikator für die Menge an alternativen Fahrtrouten zwischen einem Knotenpaar setzen sie auf die zyklomatische Zahl. Ihre Untersuchung von 33 U-Bahn-Netzen zeigt, dass größere Netze eine höhere Zyklizität aufweisen. Allerdings muss einschränkend erwähnt werden, dass dieser Indikator allein nicht aussagekräftig genug ist. Er berücksichtigt wichtige Details der Infrastruktur von Öffentlichen Nahverkehrssystemen nicht, wie z.B. Lage von Ausweichgleisen oder Gleiswechseleinrichtungen (DERRIBLE & KENNEDY 2010a, DERRIBLE & KENNEDY 2010b).



CATS und JENELIUS (CATS & JENELIUS 2012) zeigen sich kritisch, was die Erklärbarkeit von Robustheit anhand der Zyklizität betrifft. Sie sind der Auffassung, dass wichtige Eigenschaften von PTN unberücksichtigt bleiben. Dabei gehen sie von der Prämisse aus, dass diese komplexer sind als Straßennetze, da sie weniger Verbindungen (Kanten) und daher auch eine geringere Dichte aufweisen. Zudem spielen lediglich bei öffentlichen Nahverkehrsnetzwerken die Multimodalität als auch die Bedeutung des Umsteigens und der Gestaltung der Fußwegebeziehungen (Zu- und Abgang zum Verkehrsmittel, Gestaltung der Umsteigeknoten) eine wichtige Rolle. Sie schlagen zur Messung der Verwundbarkeit einen dynamischen Ansatz vor, da sie davon ausgehen, dass sowohl Angebot als auch Nachfrage über den Tag verteilt schwanken und damit auch die räumliche Verteilung der Vulnerabilität variiert. Zudem beachten sie die Zeit, die zwischen Ausfall und Rückkehr zum Normalbetrieb besteht. PTN sind durch Fahrzeugumlaufplanung und Fahrplan nicht in der Lage nach Behebung einer Störung sofort in den Normalzustand zurückzukehren. Als weiteren Einflussfaktor sehen sie die Informiertheit der Fahrgäste. Je genauer ein Fahrgast sowohl Informationen über Dauer und Ausmaß der Störung als auch über alternative Routen besitzt, desto eher ist er in der Lage Verzögerungen für sich selbst abzumildern. Dabei bemängeln CATS und JENELIUS, dass einige Studien zu optimistische Annahmen über die Informiertheit von Passagieren treffen. Sie erweitern damit die graphentheoretische Repräsentation mit Knoten und Kanten um (teilweise gut-informierte) Fahrgastströme und deren Verteilung im Tagesverlauf. Sie gehen vom Indikator **betweenness centrality** (Definition siehe Kapitel zu SNAMUTS) aus. Ihnen ist dieser allerdings nicht aussagekräftig genug, da dieser Indikator alle Knoten als gleich wichtig einstuft und als relevanten Pfad zwischen Knotenpaaren nur den jeweils kürzesten Weg ansieht. die Wahlfreiheit des Kunden über Routenweg und Abfahrtszeit, also die dem System immanenten Dynamiken abbilden. Dazu nehmen sie sowohl die Sicht des Fahrgasts als auch des Betreibers ein. Die Wahrnehmung was **zentral** ist, unterscheidet sich zwischen beiden. Während Betreiber Knoten mit hoher Linienzahl und vielen Fahrzeugen als zentral betrachten, sind dies für Fahrgäste Knoten mit einer hoher Fahrgastbelastung. Zudem kann der Grad an Zentralität einer Station im Tagesverlauf wechseln. Zur Ermittlung der Werte der Zentralität gehen auf Betreiberseite die Netzstruktur und das Fahrtenangebot, also der Fahrzeugeinsatz anhand des Fahr- und Umlaufplans ein. Auf der Nutzerseite hingegen wird Zentralität laut CATS und JENELIUS über die Menge der Fahrgäste definiert. Die Nachfrager werden einer Origin-Destination-Matrix nach ihrem Ziel- und Ausgangsknoten zugeteilt. Ein Vergleich beider Ergebnisse zeigt, dass sich die Zentralität aus Sicht von Nutzer und Betreiber in geringem Umfang unterscheidet. Zudem belegen sie, dass gut-informierte Fahrgäste, also diejenigen mit Zugang zu Echtzeitinformationen, bei Ausfäl-



len ihre Verzögerungen bzw. Fahrzeiten über Alternativen minimieren konnten. Allerdings muss im Hinblick auf diese Arbeit gesagt werden, dass diese enorme Datenmenge weder beschafft noch bearbeitet werden könnte (CATS & JENELIUS 2012).

RODRÍGUEZ-NÚÑEZ und GARCÍA-PALOMARES (RODRÍGUEZ-NÚÑEZ & GARCÍA-PALOMARES 2014) beklagen, dass trotz gestiegenem Interesse an PTN, Vulnerabilitätsstudien meist nur die Struktur des Netzwerks betrachten. Es fehle an einer Gesamtbetrachtung, die Fahrtenverteilung, Netzkapazitäten und Reisekosten zusammenbringt. Sie versuchen diesen Nachteil auszugleichen, in dem jede Fahrt einer Origin-Destination-Matrix (O-D-Matrix) zugeordnet wird. Wobei als Verbindung zwischen einem Knotenpaar der kürzeste Pfad gewählt wird, da RODRÍGUEZ-NÚÑEZ und GARCÍA-PALOMARES davon ausgehen, dass jeder Fahrgast versucht, sein Ziel auf dem schnellsten Weg zu erreichen. Aus dieser Matrix lässt sich dann die Belastung für jeden einzelnen Pfad, als Verbindung zwischen zwei benachbarten Knoten, berechnen. Anschließend wird die **criticality** (Ausfallgefahr) für jede Kante ermittelt. Dabei unterscheiden sie zwei mögliche Szenarien. Entweder wird ein Teil des Netzes vom Rest abgetrennt oder es besteht weiterhin über Umwege die Möglichkeiten alle Stationen zu erreichen. Für letzteren Fall kann die **criticality** über die Veränderung der Reisezeit ( $I$ ) wie folgt berechnet

werden:  $I_a = \bar{T}_a - \bar{T}_o$ . Wobei die Reisezeit im uneingeschränkten Zustand  $\bar{T}_o = \frac{\sum_i F_i \bar{T}_i}{\sum_i F_i}$

und im Störfall, beim Ausfall der Verbindung  $a$ , über  $\bar{T}_a = \frac{\sum_i F_i \bar{T}_{ia}}{\sum_i F_i}$  berechnet wird. Diese Berechnung wird für jedes mögliche Knotenpaar durchgeführt. Darüber hinaus haben RODRÍGUEZ-NÚÑEZ und GARCÍA-PALOMARES aber auch die Stationsebene betrachtet. Dabei untersuchen sie, wie viele Pfade von einer betroffenen Station aus begangen werden müssen, bis ein Knoten mit zwei oder mehr Fahrtalternativen erreicht wird. Auch hier geht es darum, über Fahrzeitverlängerungen zu erkennen, wie wichtig die einzelnen Verbindung bzw. Station ist. Allerdings geben sich beide nicht mit einem Störfall zufrieden, sondern untersuchen von einem Störfall ausgehend, wie sich noch weitere Vorkommnisse auf das Netzwerk und damit die Fahrzeiten auswirken. Sie haben ihre Methodik auf das Madrider Metro-Netz angewendet und kamen zu folgenden Schlüssen. Zum einen gibt es Teile des Netzes, die bei Ausfall von Verbindungen oder Stationen, nicht mehr ans Gesamtnetz angebunden sind. In diesem Fall können Fahrtwünsche gar nicht erfüllt werden. Sofern alternative Fahrtmöglichkeiten bestehen, gehen diese mit einer zum Teil erheblichen Fahrzeitverlängerung einher. Dabei zeigt sich aber, dass Metro-Netze mit tangentialen Verbindungen einen Vorteil besitzen, da über die tangentialen Verbindungen weitere Metro-Linien erreicht werden können und somit Alternativen zur Verfügung stehen. Radiale Linien neigen

dazu bei Störungen Teile nicht mehr bedienen zu können. Problematisch an der Untersuchung von RODRÍGUEZ-NÚÑEZ und GARCÍA-PALOMARES ist, dass auch sie die Multimodalität urbaner Nahverkehrsnetze außen vor lassen. Bei Störfällen der U-Bahn greifen Passagiere auf vorhandene Angebote von Bus, Tram, S-Bahn und zum Teil sogar Regionalzüge zurück, um ans Ziel zu gelangen. Ihre Untersuchung greift mit der alleinigen Betrachtung des Metro-Netzes zu kurz (FERBER et al. 2009, RODRÍGUEZ-NÚÑEZ & GARCÍA-PALOMARES 2014).

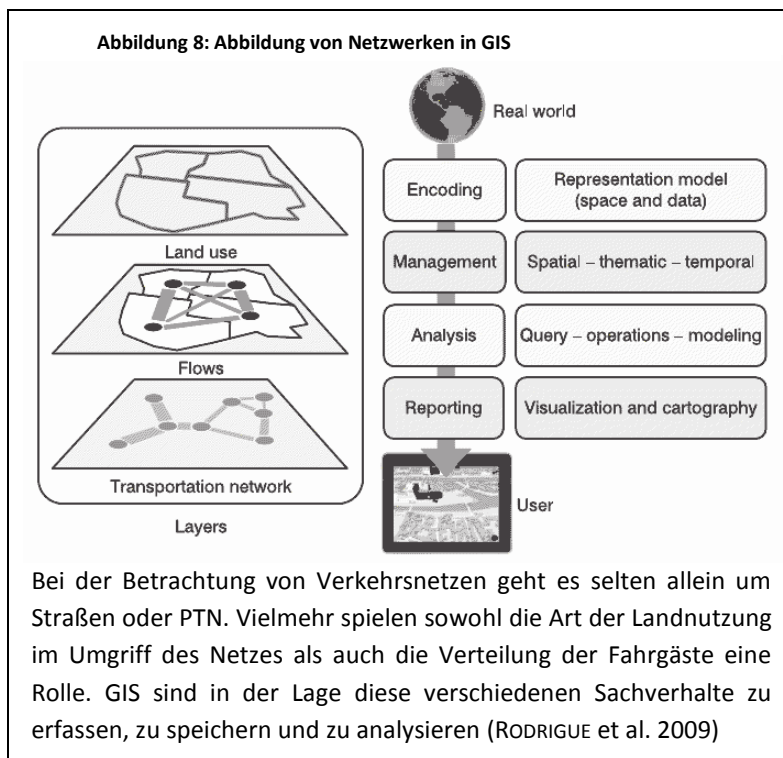
#### 6.4 ZUSAMMENFASSUNG

Die Graphentheorie hat sich eingehend mit Verkehrsnetzwerken beschäftigt und dabei zwar mehrheitlich, aber nicht ausschließlich Straßensysteme betrachtet. Die Darstellung von Netzwerken anhand von Knoten und Kanten kann auf den ÖPNV angewendet werden. Knoten sind hierbei die Haltestellen und damit sowohl die Zugangspunkte als auch die Ziele innerhalb des zu betrachtenden Systems. Die Kanten, als Verbindungen zwischen den Knoten (=Haltestellen), übernehmen die Repräsentation der Nahverkehrslinien, wobei eine Kante mehrere Linien, sofern mehrere Linien das gleiche Knotenpaar verbindet, darstellen kann. Die räumliche Verteilung und Beschaffenheit der Knoten und Kanten erlaubt wichtige Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Netzes und damit die Eignung des Netzes, die Mobilitätsbedürfnisse der Einwohner der Untersuchungsregion zu befriedigen.

## 7 GIS-BASIERTE ANWENDUNGSKONZEPTE

### 7.1 OPERATIONALISIERUNG VON NETZWERKEN IN GIS ALLGEMEIN

Im vorherigen Kapitel wurden die Grundlagen der Graphentheorie und ihre Bedeutung für Verkehrsnetze betrachtet, in diesem Teil der Arbeit soll es nun um den Einsatz von Geoinformatik und GIS-Software bei der Untersuchung von PTN gehen. GIS spielen auf Grund ihrer Fähigkeit räumlich referenzierte Daten zu erfassen, zu speichern, zu analysieren und zu visualisieren eine große Rolle in der Raumanalyse und haben sich auch in der Betrachtung von Verkehrssystemen etabliert (RODRIGUE et al. 2009, KNOX & MARSTON 2001, BRAND et al. 2012). Auf den Verkehrsbereich und seine Fragestellungen abgestimmt, kann eine Analyse unter GIS-Einsatz wie folgt ablaufen. Nach RODRIGUE (RODRIGUE et al. 2009) dient der erste Schritt, das **Encoding**, dazu, die Topologie, also die Knoten und Kanten, eines Verkehrsnetzes korrekt zu erfassen. Dabei muss auf die Eigenheiten von der aufgenommenen Infrastruktur, wie zum Beispiel Ausstattung, Breite oder Fahrtrichtung, Rück-



sicht genommen werden. Zudem müssen andere für die spätere Analyse wichtige Daten aufgenommen und verortet werden. **Management** bezeichnet dann die Datenhaltung. Diese kann nach verschiedenen Kriterien, wie räumlich, zeitlich oder thematisch erfolgen. Die Struktur muss einheitlich sein und einen einfachen

Zugriff auf die Daten bieten. Im dritten Schritt, **Analysis**, werden die gesammelten Daten unter Zuhilfenahme verschiedener Methoden und Werkzeugen untersucht. Das **Reporting**, als letzter Schritt, gibt die bearbeiteten Daten und Ergebnisse entweder in digitaler Form oder visuell gestaltet aus. Vor allem die Ausgabe als Grafiken (zumeist Karten) sind ein

wertvolles Hilfsmittel, um Zusammenhänge für Außenstehende einfach erklärbar und verständlich zu machen. Allerdings stoßen auch GIS an ihre Grenzen. Die auf dem objektbasierten Datenmodell fußende Darstellung der für die Graphentheorie bedeutsamen Knoten und Kanten, stellt noch keine unlösbare Herausforderung dar. Allerdings kommt ein zweidimensionales kartesisches Koordinatensystem schnell an seine Grenzen, wenn es darum geht Ereignisse entlang einer Linie genau zu verorten und zu beschreiben. Das Problem des linear referencing (z.B. Unfall bei Kilometer 53 auf der A8) kann unter Zuhilfenahme des dynamic segmentation model aufgelöst werden. Auch für die in der Verkehrswissenschaft oft gebräuchliche und auch schon angesprochene Origin-Destination-Matrix musste eine „Übersetzung“ in den GIS-Bereich mit seinem räumlichen Bezug geschaffen werden (RODRIGUE et al. 2009).

## 7.2 SPATIAL NETWORK ANALYSIS OF PUBLIC TRANSPORT ACCESSIBILITY (SNAPTA)

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen Analysemethoden sind nicht zwingend auf die Einsetzbarkeit in einem GIS ausgelegt. Die folgenden Ansätze, wie das SPATIAL NETWORK ANALYSIS OF PUBLIC TRANSPORT ACCESSIBILITY (SNAPTA) Modell, nutzen die Funktionalitäten die ein GIS-System bietet. SNAPTA entstand aus der Idee heraus, politischen Entscheidungsträgern ein praktisches Werkzeug zur Bewertung von Ausbaumaßnahmen im ÖPNV an die Hand zu geben. Diese sollten anhand von SNAPTA in die Lage versetzt werden, die Stärken oder Schwächen der Integration von Landnutzungsformen und Verkehrssystemen zu bewerten. Bisher wurde dieses Modell nur auf das Beispiel Edinburgh angewendet (KAROU & HULL 2014).

Das Ziel von SNAPTA ist es, räumliche Erreichbarkeit und Gleichheit beim Zugang zum ÖPNV zu bewerten. Darüber hinaus soll es auch die Auswirkungen von geplanten Verkehrsprojekten des lokalen Nahverkehrsplans auf die Erreichbarkeit vorhersagen. Erreichbarkeit wird dabei wie folgt definiert: „whether or not people can get to services and activities at a reasonable cost, in a reasonable time and with reasonable ease“ (CITY OF EDINBURGH COUNCIL 2007). Um dies messen zu können, wurde ein GIS-basiertes Instrument entwickelt. Dieses fußt auf drei Indikatoren, die die Erreichbarkeit genauer beschreiben sollen. Indikator 1 ist die Zeit, die benötigt wird während der Hauptverkehrszeit am Morgen von einem Standort aus zum Zentrum einer Stadt zu gelangen (**access time to city centre**). Dieser errechnet sich entweder über die kürzeste Fahrzeit oder die kürzeste Wegstrecke ausgehend von nächsten

Zugangspunkt innerhalb der Ausgangszone zum Zentroid des Central Business Districts (genaue Beschreibung der Implementierung folgt im nächsten Abschnitt). Der zweite Indikator misst die Anzahl an ökonomischen Aktivitäten oder Destinationen die innerhalb einer maximalen Fahrzeit, die nach Reisezweck differiert, erreichbar sind. Dieser wird als **contour measure** bezeichnet. Als letzter Anzeiger wird die potentielle Erreichbarkeit evaluiert (**potential accessibility measure**). Dieser gewichtete Indikator beinhaltet sowohl die Reisezeit zwischen der Ausgangs- und Zielzone als auch ein Landnutzungselement, das wiederum durch die Anzahl oder Größe der Aktivitätsmöglichkeiten der Zielzone definiert ist. Überdies enthält dieser Indikator auch eine Widerstandsfunktion, denn es wird davon ausgegangen, dass mit zunehmender Entfernung die Attraktivität<sup>14</sup> von Zielregionen abnimmt. Die potentielle Erreichbarkeit ist schwieriger zu berechnen. Die Berechnung startet mit der Ermittlung der kürzesten Fahrzeit. Diese wird dann mit der Attraktivität der Zielzone in Beziehung gesetzt. Dies geschieht mit Hilfe der Hansen Gleichung<sup>15</sup>. Während die ersten beiden Indikatoren sich damit auf die Distanz zwischen Ausgangs- und Zielort konzentrieren, misst der dritte die mögliche Interaktion zwischen beiden (KAROU & HULL 2012, KAROU & HULL 2014, HULL & KAROU 2012).

SNAPTA greift auf die Scottish Census Data Zones zurück, die jeweils zwischen 500 und 1000 Einwohnern aufweisen. Da das Modell davon ausgeht, dass alle Personen im Zentroid der Zone vorkommen, werden die Zentroide auf Basis der Einwohnerdichte Neuberechnet. Dies soll verhindern, dass die Bevölkerung fälschlicherweise Gebieten innerhalb der Zone zugerechnet wird, die nicht bewohnt sind, wie Parks oder unbebauten Flächen. Diesen Zonen werden dann die Daten zu Landnutzung und Sozio-Demographie zugeordnet. Darunter fallen neben der genauen Bevölkerungszahl auch die Angaben zu Arbeitsplätzen, Verkaufsfläche und der Zahl von Nutzern verschiedenster Einrichtungen. Diese wurden unter Lizenz von Verwaltungsstellen zur Verfügung gestellt. Andere Daten, wie die Zahl von Studenten, Nutzern oder Größe von Freizeiteinrichtungen wurden von Webseiten übernommen. Das Verkehrsnetzwerk wird in GIS modelliert und stellt das gesamte Untersuchungsgebiet dar. Dabei wird das Verkehrssystem aus Knoten und Linien gebildet, wobei die Knoten auch

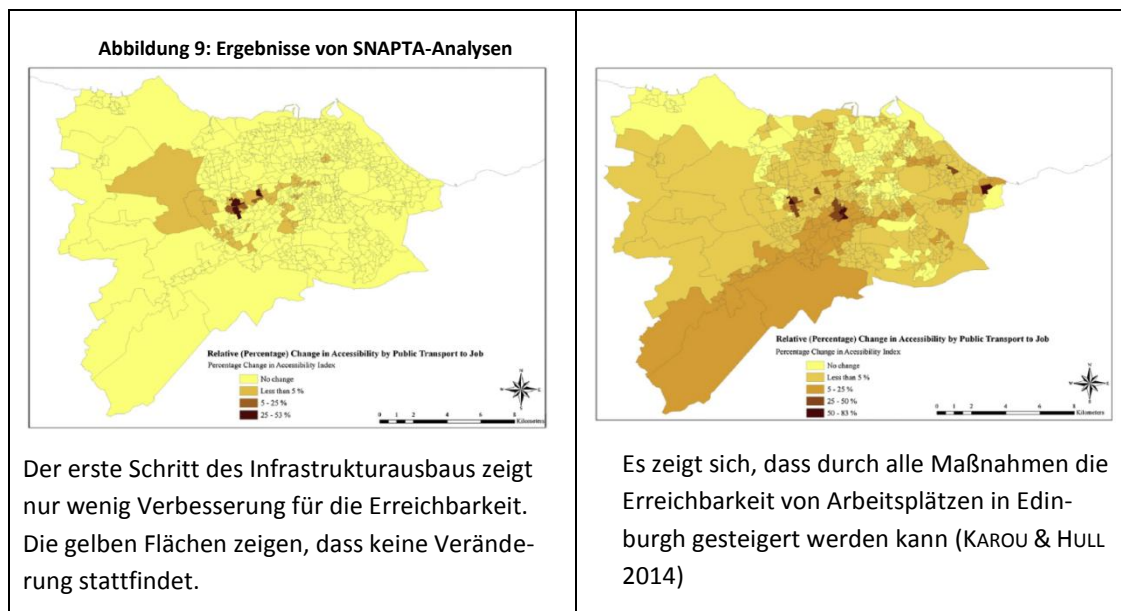
---

<sup>14</sup> Die Aktivitäts-Möglichkeiten werden wie folgt definiert: Six types of activity opportunities were selected to measure the accessibility of their locations by public transport within the Edinburgh Council's area. These are: (1) the central business district (CBD); (2) employment; (3) retail opportunities; (4) education opportunities; (5) health opportunities; and (6) leisure and recreation opportunities (KAROU & HULL 2014)

<sup>15</sup>  $A_i = \sum_J a_j f(t_{ij})$  wobei  $a_j$  die Attraktivität der Zielzone  $J$  und  $t_{ij}$  die Reisezeit zwischen Ausgangs- und Zielzone ist. Die Distanz zwischen den Zonen beschreiben  $i$  und  $j$  und die Widerstandsfunktion ist  $f(t_{ij})$  (KAROU & HULL 2014).

gleichzeitig die Zugangspunkte sind. Das Modell erlaubt dabei dem „Bewohner“ einer Zone nur den nächsten Zugangspunkt zum Öffentlichen Nahverkehr innerhalb seiner eigenen Zone zu nutzen. Darüber hinaus werden für jede Verbindung der Typ, die Länge und die Fahrzeit hinterlegt. Das Modell berücksichtigt auch die dem ÖPNV immanenten Eigenheiten wie Zugangszeiten, allerdings nur die fußläufige Zeit zum Zugangspunkt, Wartezeiten, Fahrzeiten und Übergangszeiten (KAROU & HULL 2014, HULL & KAROU 2012).

KAROU und HULL (KAROU & HULL 2014) wendeten das SNAPTA-Modell an, um die Auswirkungen von Projekten auf die Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen zu ermitteln. Sie haben dabei die möglichen Auswirkungen des Ausbaus der Trambahn sowie des Wiederaufbaus der Edinburgh South Suburban Railway (ESSR) untersucht. Dabei wurden auch die Auswirkungen des Infrastrukturausbaus in Teilschritten beachtet. Die Ergebnisse sind daher wenig überraschend. Je mehr Infrastruktur gebaut wird, desto besser wird die Erreichbarkeit im Gegensatz zur Ausgangslage bzw. zum Minimalausbau. Hervorzuheben ist, dass es SNAPTA gelingt, den Ausgangszustand der Erreichbarkeit verständlich abzubilden. Es lässt sich beispielsweise über die Qualität der Verteilung von Haltestellen urteilen. Zudem gelingt es dem Modell auf einfache Weise die Auswirkungen einzelner Projekte oder deren Zwischenschritte aufzuzeigen. Die kartographische Darstellung ermöglicht es zudem die Ergebnisse leicht verständlich zu illustrieren. Dies zeigen auch die beiden folgenden Abbildungen:



Allerdings hat SNAPTA durchaus auch Nachteile. Das Zusammentragen der Daten ist wie das Einpflegen in eine GIS-Datenbank zeitaufwendig. Noch dazu sind viele der Daten nur „under license“ von Verwaltungsstellen zu erhalten (KAROU & HULL 2014). Noch dazu ist

SNAPTA auf die ArcGIS-Software-Familie und Ihre Erweiterungen (v.a. Network Analyst) zugeschnitten. Eine Übertragung auf freie Software ist also nicht ohne Weiteres möglich. Gravierender als diese Nachteile aber ist aus Sicht von HULL und KAROU (HULL & KAROU 2012), die Verwendung der Zentroide der Scottish Census Data Zones. SNAPTA geht damit davon aus, dass alle Personen in einer Zone die gleiche Erreichbarkeit besitzen. Da sie aber dispers verteilt sind, sich ihre Ziele unterscheiden und in einigen Fällen Zugangspunkte zum ÖV in anderen Zonen näher sein dürften, sind die Ergebnisse kritisch zu hinterfragen. Einen weiteren Kritikpunkt fassen HULL und KAROU wie folgt zusammen:

*“Another drawback is that the opportunities which are located just outside the modeled area even by only a few seconds are neglected. Assuming a walk time between origin and destination and boarding point of 10 or 15 minutes [...] rather than calculating the actual walk time through the pedestrian network can be considered a weakness” (KAROU & HULL 2012).*

Größtes Problem aber dürfte die Verwendung der Fahrzeit in die Innenstadt sein, da dieser Indikator die Polyzentralität vieler Großstädte außer Acht lässt. Edinburgh besitzt rund 490.000 Einwohner (CITY OF EDINBURGH COUNCIL). Ein für diese Stadtgröße entwickeltes Konzept dürfte sich schwerlich auf Großstädte wie München (rund 1,5 Millionen Einwohner (MÜNCHEN 2014) oder Wien (rund 1,75 Millionen; STADT WIEN o.A.) anwenden lassen.

## 7.3 SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT PLANNING (SNAMUTS)

### 7.3.1 ZIELE VON SNAMUTS

SNAMUTS ist die Abkürzung für ein GIS-basiertes Werkzeug zur Bewertung von Nahverkehrssystemen. Diese steht für Spatial Network Analysis for Multimodal Urban Transport Systems. Es wird von einem derzeit aus fünf Personen bestehenden Team der australischen Universitäten Curtin University in Perth und des Royal Melbourne Institute of Technology betreut (SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS 2014c). Die Finanzierung erfolgte projektbezogen durch verschiedene Institutionen Australiens seit 2006 (CURTIS & SCHEURER 2010). Diese scheint größeres Ausmaß angenommen zu haben, da es eines der wenigen Tools mit einer eigenen Homepage ([www.snamuts.com](http://www.snamuts.com)) ist. Zudem nimmt die Zahl der untersuchten Gebiete weltweit zu, während andere Werkzeuge meist auf einzelne Fallstudien oder Länder begrenzt bleiben (SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS 2014d).

Laut SCHEURER (SCHEURER 2013) liegt das Ziel von SNAMUTS darin, die Funktion von Verkehrsnetzwerken im Siedlungskontext zu quantifizieren und evaluieren. „It is a GIS-based tool designed to assess centrality and connectivity (primarily) of urban public transport networks in their land use context, and in their market position among multi-modal travel options“ (CURTIS & SCHEURER 2010). Durch SNAMUTS sollen Aussagen über die räumliche Abdeckung eines Netzwerks, die Fähigkeit und Eignung dessen Aktivitäten zu verbinden, die strategische Bedeutung von Linien und Knoten des Systems sowie die Wettbewerbsfähigkeit, basierend auf dem Vergleich der Fahrzeiten von ÖPNV und Individualverkehr, getroffen werden. Die errechneten Ergebnisse werden zum besseren Verständnis in Kartenform publiziert und sollen so Diskussions- bzw. Entscheidungshilfen für nachhaltige Verkehrsentwicklung im urbanen Kontext spielen. Um dieses Ziel zu erreichen wurde bei der Entwicklung des Werkzeugs „SNAMUTS“ besonderen Wert auf einen Best-Practice-Ansatz gelegt. Aus der bestehenden Literatur zum Thema wurden die wichtigsten Erfolgsfaktoren extrahiert. Aus der Sicht von SNAMUTS sind folgende Punkte die bestimmenden Einflussgrößen:

- Ausdehnung, Abdeckung und Fahrtenhäufigkeit eines Öffentlichen Nahverkehrssystems bestimmten die Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich mit dem Individualverkehr.
- Eine lesbare Netzstruktur erlaubt es, dem Verkehrsunternehmen wirtschaftlich zu bestehen und bietet dem Nutzer eine verständlich Übersicht und eine möglichst große Auswahl an Verbindungen an.
- Der Nahverkehr muss entlang der Haupttrouten einer Agglomeration Fahrzeitleistungsgegenüber dem Individualverkehr besitzen.
- Die Stadtentwicklung unterstützt die Vernetzung mit dem ÖPNV (v.a. an wichtigen Knotenpunkten bzw. Aktivitätsschwerpunkten) durch kurze Wege zu den Zugangspunkten, dichte Bebauung und Funktionsmischung.
- Eine (politisch, rechtlich) verbindliche Rahmensetzung ist zwingend notwendig, um die öffentliche Finanzierung zu sichern (CURTIS & SCHEURER 2010, CURTIS et al. 2012a, CURTIS et al. 2012b)

Diese fünf oben genannten Einflussgrößen müssen wiederum anhand von Indikatoren messbar gemacht werden. Nur so kann die unterstellte Hypothese, dass ÖPNV an Orten mit größerer Zentralität mehr Fahrgäste verzeichnet, bewiesen werden. Wobei Zentralität hier im geographischen Sinn, als Nähe zu verschiedenen und vielfältigen urbanen Angeboten bzw. Aktivitäten, untersucht wird. Netzwerke hingegen lassen sich auf verschiedene Art und Weise messen. Es hängt davon ab, welche Struktur von Knoten und Linien, welche räumliche Verteilung und Beziehung diese zu den umgebenden Räumen (Funktionstrennung im urbanen Raum) haben. SNAMUTS zielt darauf ab, anhand des Konzepts der *Netzwerk-Konnektivität* die Veränderung des Grades an Zentralität einzelner Standort innerhalb



einer Stadtregion vor und nach Infrastrukturmaßnahmen zu bewerten bzw. bewertbar zu machen (CURTIS et al. 2012b, CURTIS & SCHEURER 2010).

### 7.3.2 OPERATIONALISIERUNG DER SNAMUTS-INDIKATOREN

Bevor die Indikatoren zur Berechnung vorgestellt werden, muss noch kurz auf die Grundannahmen von SNAMUTS eingegangen werden. Die Erstellung des Basis-Netzwerks ist dabei der Ausgangspunkt. Das Haupthindernis für die Nutzung des ÖPNV liegt nicht in der zu bewältigenden Entfernung. Dieses stellt hauptsächlich die Reisezeit zwischen Ausgangs- und Zielpunkt und die Fahrtenhäufigkeit dar. Daher werden von SNAMUTS auch nur solche Gebiete analysiert, die zumindest in einem definierten Mindeststandard bedient werden. Laut CURTIS und SCHEURER wurde als Minimalbedienung ein 30-Minuten-Takt in der Zwischenverkehrszeit (10.00 bis 15.00 Uhr) gewählt. Die zu Grunde liegende Annahme ist, dass Nutzern auch außerhalb der Hauptverkehrszeit ein Angebot offeriert wird, dass es erlaubt, Ziele im ÖPNV zu erreichen und den ÖPNV auch in diesem Zeitraum als Alternative zum Individualverkehr zu akzeptieren. Zudem werden die Aktivitätszentren des urbanen Raums und die Umsteigeknoten ermittelt. Erstere sind alle „non-home destinations“ (CURTIS & SCHEURER 2010). Als letztere gelten nur diejenigen Haltestellen im System, die den Umsteigevorgang möglichst komfortabel gestalten (Beschilderung, Laufwege, Zugang für mobilitätseingeschränkte Personen).

SNAMUTS ist scheinbar kein statisches Werkzeug. In den vorliegenden zwei Fallbeispielen überschneiden sich nicht alle Indikatoren. In der Studie zu Perth aus dem Jahr 2010 nennen CURTIS und SCHEUER die folgenden sieben SNAMUTS Indikatoren:

1. **Degree centrality** by transfers (Zentralität des Grades<sup>16</sup>): misst die durchschnittlich geringste Anzahl von Umstiegen, die benötigt wird, um von jedem Knoten aus zu jeweils allen anderen Knoten zu gelangen. Es werden also die Umsteigevorgänge berechnet, die einen Knoten vom Rest des Netzes trennen. Die Berechnung erfolgt über folgende Formel:

$$CD_i = \sum \frac{p_{min,ij}}{N - 1}$$

wobei  $CD_i$  die Zentralität des Knoten  $i$  darstellt. Diese berechnet sich aus der Summe

<sup>16</sup> Die Übersetzung der englischen Begriffe ist dem Vortrag JAN SCHEURERS aus dem Jahr 2013 an der TU München entnommen (SCHEURER, 2013). Übersetzungen von den Punkten 6 und 7 liegen nicht vor und wurden auch nicht übersetzt.

von  $p_{min,ij}$  (minimale benötigte Umstiege zwischen den Knoten  $i$  und  $j$  wobei,  $j \in N$  und  $i \neq j$ ) sowie  $N - 1$  (als Summe aller Knoten minus einem).

2. **Closeness centrality by impediment** (Zentralität der Nähe): beschreibt den Raumwiderstand. Der durchschnittlich geringste Widerstand wird aus für alle Netzwerkpfade und für die Verbindung von jedem Knoten zu jedem Knoten im System dadurch berechnet, dass die Fahrzeit durch die Fahrtenhäufigkeit jedes Liniensegments geteilt wird.

$$CC_i = \sum \frac{L_{ij}}{N - 1}$$

wobei  $CC_i$  gleich der Zentralität der Nähe des Knotens  $i$  und  $L_{ij}$  der kumulierte Widerstandswert zwischen den Knoten  $i$  und  $j$  ist.

3. **Contour catchment** (Einzugsbereich der Reisezeitkontur): misst die Zahl von Einwohnern und Arbeitsplätzen, die innerhalb von 30-Minuten Fahrzeit von einem Ausgangsknoten erreichbar sind.

$$CI_i = \frac{act(c_i)}{act(m)}$$

wobei  $CI_i$  gleich Einzugsbereich um den Knoten  $i$ ,  $c_i$  gleich 30-Minuten-Reisezeitkontur,  $act(c_i)$  gleich der Anzahl von Einwohnern und Arbeitsplätzen an Knoten  $i$  sowie  $act(m)$  gleich der Anzahl aller Einwohner und Arbeitsplätze des Untersuchungsgebiets ist.

4. **Betweenness centrality** (Zentralität der Zwischenlage): misst die Prozentzahl an schnellsten Netzwerkverbindungen zwischen zwei Knoten die durch ein bestimmtes Routensegment verlaufen. Dies zeigt wie sich Reisegelegenheiten räumlich über das gesamte Netz verteilen.

$$CB_{k,w} = \frac{\sum(p_{ij}(k) * (act_i * act_j) / L_{ij})}{\sum(p_{ij} * (act_i * act_j) / L_{ij})}$$

wobei  $CB_{k,w}$  gleich der gewichteten Zentralität der Zwischenlage für das Routensegment  $k$ ,  $p_{ij}(k)$  gleich dem Pfaden zwischen den Knoten  $i$  und  $j$  die durch das Segment  $k$  verlaufen und  $p_{ij}$  gleich aller Pfade des Netzwerks ist.

5. **Network connectivity** (Netzwerkverknüpftheit): berechnet die Eignung jedes städtischen Aktivitätszentrums als Umsteigeknoten zu fungieren.

$$CV_i = \frac{(\sum a_{ij} - 2) + (o_r f_r(i))}{50} + \frac{o_t f_t(i)}{50} + \frac{o_b f_b(i)}{50}$$

wobei  $CV_i$  gleich der Netzwerkverknüpftheit des Knotens  $i$ ,  $a_{ij}$  gleich der konvergen-  
ten Verbindungen im Knoten  $i$ , wobei gilt, dass  $j \in N$  und  $i \neq j$ ,  $N_i$  gleich der  
nächsten Nachbarn Knoten zu Knoten  $i$ ,  $f(i)$  gleich der Fahrten pro Stunde am Kno-  
ten geordnet nach Eisenbahn  $f_r$ , Trambahn  $f_t$  und Bus  $f_b$ ,  $o$  gleich dem durchschnitt-  
lichen Fahrgast-Besetzungsgrads im Gesamtsystem (wieder nach Bahn, Tram und  
Bus) differenziert ist.

6. **Efficiency change**: vergleicht die Veränderung im Widerstand vor und nach Infra-  
strukturmaßnahmen.
7. **Speed competitiveness**: vergleicht die langsamste Fahrzeit im ÖPNV mit der Fahrzeit  
im Individualverkehr während der staugefährdeten Hauptverkehrszeit auf allen  
Netzwerkpfaden und von jedem Knoten zu allen anderen (CURTIS & SCHEURER 2010).

Diese unterscheiden sich damit teilweise von jenen, die SCHEURER im Jahr 2013 in sei-  
nem Vortrag an der TU München nennt. Während die ersten fünf Punkte (in der obigen  
Aufstellung in blauer Schrift) bis auf Nuancen dieselben Kriterien widerspiegeln, fehlen die  
beiden letzten (in roter Schrift). SCHEURER ersetzt diese durch folgende zwei Indikatoren.

**Service intensity** (Bedienungsintensität) als Maßstab für die Bedienungsintensität.  
Diese beschreibt den Betriebsaufwand der nötig ist, um den von SNAMUTS geforderten  
Mindeststandard zu gewährleisten.

**Network resilience** (Netzbelastbarkeit) als Anzeiger für Ungleichgewichte zwischen  
der Bedeutung von Strecken, Knotenpunkten bzw. städtischen Aktivitätszentren und dem  
Angebot des ÖPNV (SCHEURER 2013).

Abschließend errechnet SNAMUTS aus den Ergebnissen der wichtigsten Indikatoren,  
diese unterscheiden sich zwischen den Studien, einen **composite indicator** (zusammenge-  
setzter Index) (SCHEURER 2013, CURTIS et al. 2012b, CURTIS et al. 2012a). Bei der Untersu-  
chung zu Perth im Jahr 2008 waren die Faktoren *degree centrality*, *closeness centrality*,  
*contour catchment*, *congested speed ratio*, *nodal betweenness* und *connectivity* die sechs

Schlüsselindikatoren. Diese wurden auf eine Skala zwischen 0 und 7 umgerechnet um sie alle ähnlich zu gewichten (CURTIS & SCHEURER 2010). Im Jahr 2012 ist diese Zusammensetzung zwar noch dieselbe, allerdings wurde die Skala vergrößert. Sie umfasst bereits Werte zwischen 0 und 10 (CURTIS et al. 2012a). In der Studie zu München bleibt zwar der Skalenbereich im Vergleich zu 2012 unverändert, die *Netzbelastbarkeit (network resilience)* hat dafür die *congested speed ratio* ersetzt (SCHEURER 2013).

### 7.3.3 BEDEUTUNG VON SNAMUTS

SNAMUTS scheint ein bedeutendes und starkes Werkzeug zu sein. Sein Vorteil liegt in der Vergleichbarkeit der Ergebnisse über urbane Räume hinweg. Bisher wurden 23 Städte analysiert (SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS 2014d). Die Unterstützung mit Forschungs- und Projektgeldern scheint es zu ermöglichen, große Datenmengen zu verarbeiten. Das Team besteht derzeit aus fünf Personen, wobei die Datenakquise nicht allein von diesem Team durchgeführt wird. In Hamburg haben fünf Personen, nicht nur aus dem universitären Bereich sondern auch aus der Verwaltung und dem Hamburger Verkehrsverbund, vor Ort diese Aufgaben übernommen (CURTIS & SCHEURER 2010). SNAMUTS ist auf Personen jenseits des Kernteams angewiesen. Das folgende Zitat von der Webseite belegt dies:

*SNAMUTS cities are selected from around the world based on the availability of population and employment distribution data, the presence of an applicable public transport system and through networking and building relationships with local contacts who can help expedite the process of data collection (SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS 2014d).*

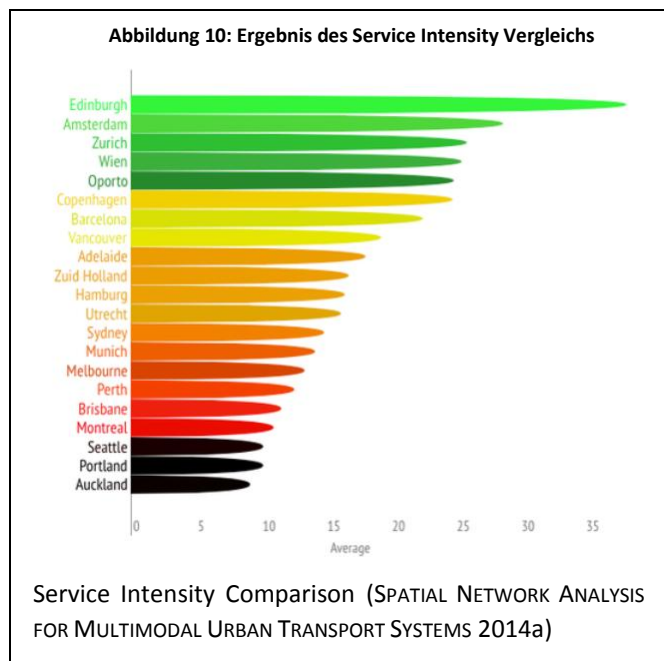
Diese immense Datenmenge führt dazu, dass durch SNAMUTS Aussagen über die Auswirkungen von Infrastrukturmaßnahmen auf die Erreichbarkeit innerhalb urbaner Räume getätigt werden können. Die kartographische Darstellung der Ergebnisse erhöht dann nochmals den Erkenntnisgewinn für Politiker, Planer und auch die Allgemeinheit. Zwar sind nicht alle Ausgabeformen leicht verständlich, trotzdem belegen sie meist die subjektiven Einschätzungen der vor Ort arbeitenden Personen aus einschlägigen Planungsbereichen (CURTIS et al. 2012a). Aus wissenschaftlicher Sicht ist es zu bedauern, dass die Veränderungen in der Zusammensetzung der Indikatoren zwar beim Überblick über verschiedene Veröffentlichungen erkennbar sind, aber keine Angaben zur Modellierung der neuen Indikatoren gemacht wird (SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS 2014b). Im

Jahr 2010 haben sich CURTIS und SCHEURER noch die Mühe gemacht ihr Vorgehen und ihre Berechnungsweise strukturiert und ausgiebig zu dokumentieren (CURTIS & SCHEURER 2010).

### 7.3.4 SNAMUTS ERGEBNISSE FÜR MÜNCHEN

SNAMUTS vereint sehr viele Indikatoren in sich. Teilweise scheinen die Autoren selbst mit der Terminologie zwischen den verschiedenen Studien zu springen. Diese Menge an untersuchten Daten und Fülle an Ergebnissen ist für Außenstehende zuerst kaum zu überblicken. Der Vorteil aber liegt wie bereits erwähnt in der Vergleichbarkeit von verschiedenen Stadtregionen untereinander. Im Folgenden werden die Ergebnisse für München genauer unter die Lupe genommen, wobei hier nur Abbildungen zu den internationalen Vergleichen, soweit diese entweder in der Literatur vorhanden oder im Internet zugänglich sind, eingearbeitet werden. Die kartographischen Darstellungen zu den einzelnen Indikatoren finden sich im Internet unter [www.snamuts.com/munich.html](http://www.snamuts.com/munich.html) (SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS 2014e). München bietet sich an, da die vorliegende Arbeit ebenso auf München als Untersuchungsraum zurückgreifen wird. SCHEURER geht in seinem Vortrag an der TU München als

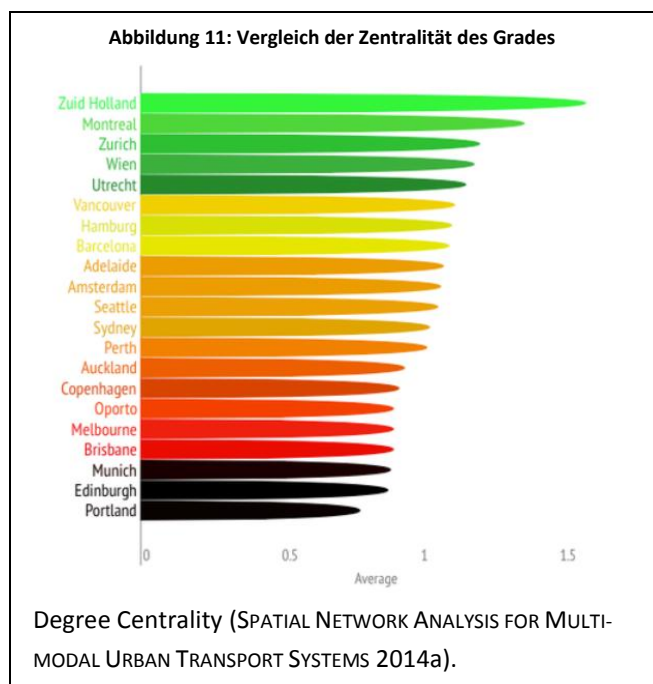
erstes auf einen Indikator ein, der bei den vorherigen Studien nicht erwähnt wird, nämlich die *service intensity* (Bedienungsintensität). Diese hängt an der Bedeutung des schienengebundenen ÖPNVs einer Region. Zu Grunde liegt ihr die Annahme, dass S-Bahnen, U-Bahnen und Trambahnen im Gegensatz zu Bussen größere Mengen an Menschen pro Fahrzeug



transportieren können und damit weniger Fahrten pro Stunde benötigt werden, um die gleiche Anzahl an Fahrgästen zu befördern. Zudem erlaubt schienengebundener ÖPNV auf Grund der höheren Gefäßgröße auch eine sparsamere Netzplanung, da das Einzugsgebiet auch von der Beförderungskapazität abhängt. Weniger Netzplanung ist hier also gleichbedeutend damit, dass weniger Linien parallel zueinander verkehren (SCHEURER 2013).

Die Bedienungsintensität wiederum beeinflusst den Indikator closeness centrality (Zentralität der Nähe). Dieser misst den Raumwiderstand, also die räumliche Trennung im Netz. Die maßgeblichen Einflussgrößen dabei sind die räumliche Ausprägung der Untersuchungsregion (z.B. verstreute Siedlungspunkte oder Kompaktheit), erzwungene Umwege durch missing links im Verkehrssystem und Betriebsgeschwindigkeit sowie Taktfrequenz. München zeigt hier im internationalen Vergleich Schwächen. Die schon angesprochene fehlende Bedienungsintensität gepaart mit der vorherrschenden niedrigen Taktfrequenz lassen München bei diesem Indikator hinter den besten zurückhängen (SCHEURER 2013).

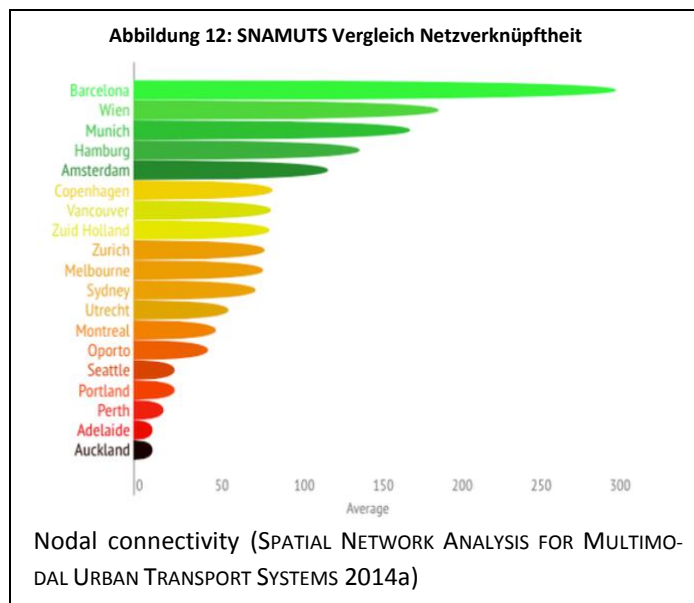
Auch beim Indikator degree centrality (Zentralität des Grades) schneidet München unterdurchschnittlich ab. Der Aufbau des Nahverkehrssystems scheint daher nicht perfekt zu sein, da zu viele Umstiege benötigt werden um an Ziele innerhalb des Untersuchungsgebiets zu gelangen. In Städten mit hohen Werten (zwischen 1 und 1,5) sind laut SCHEURER (SCHEURER 2013) Aktivitätszentren sowohl durch radial als auch tangential verlaufende Linien miteinander verbunden. München hingegen hat immer noch ein hauptsächlich radiales System mit einer Ausrichtung auf die zentralen Umsteigeknoten in der Innenstadt.



Die Indikatoren network coverage (Netzausdehnung) und contour catchments (Einzugsbereiche) stehen in engen Zusammenhang. Während die Netzausdehnung eine rein geographische Beschreibung aller mit dem Öffentlichen Nahverkehr einer Untersuchungsregion zu erreichender Orte ist, zeigt der Einzugsbereich auch die Qualität auf. Der Einzugsbereich wird also mit einer Qualität hinterlegt, im Falle von SNAMUTS durch die Mindeststandards und die Abgrenzung nach 30 Minuten Fahrzeit. SCHEURER sieht den Wert dieser Indikatoren darin, dass sich zeigen lässt, welches Interesse die Politik an attraktiven ÖV-Angeboten wirklich hat und in wie weit sie bereit ist, sich finanziell zu engagieren, oder ob nur Alibi-Angebote gemacht werden (SCHEURER 2013). Die Indikatoren betweenness centrality (Zentralität der Zwischenlage) und nodal betweenness (lokale Zwischenlage) sollen Aussagen zu Reisegelegenheiten im ÖPNV ermöglichen. Während ersterer hierzu die

bevorzugten (schnellsten bzw. wenigste Umstiege) Reisewege zwischen jedem Knotenpaar ermittelt, um die Bedeutung für das ganze System zu erklären, misst der zweite die Potentiale an Aktivitätszentren. Wobei hier hohe Werte nicht gleichbedeutend mit besserer Erreichbarkeit sind. Netze die wenige Knoten mit extrem hohen Werten oder wenige Knoten mit hohen und gleichzeitig vielen Knoten mit niedrigen Werten aufweisen, sind wahrscheinlich eher schnell überlastet. In diese Kerbe schlägt auch der Indikator network resilience (Netzbelastbarkeit). Er ermittelt Ungleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage, wobei diese sowohl von der Stadtstruktur, also den Angeboten vor Ort, als auch der Netzstruktur (Umsteigeknoten) abhängt. Sobald jedoch Angebote angepasst werden, um z.B. Fahrzeugfüllgrade durch höhere Taktfrequenz zu verringern, senkt dies die Belastbarkeit. Network resilience aber ist einer der Indikatoren, der durch Politik und Verwaltung stark beeinflusst werden kann. Durch Netzausbauten, Linienumstellungen oder Umstellen auf eine andere Gefäßgröße ist dieser veränderbar (SCHEURER 2013).

Der letzte Indikator, nodal connectivity (Netzverknüpftheit) zeigt, dass München gut abschneidet, wenn es um die Frage geht, in welchem Umfang die vorhandenen Knoten als

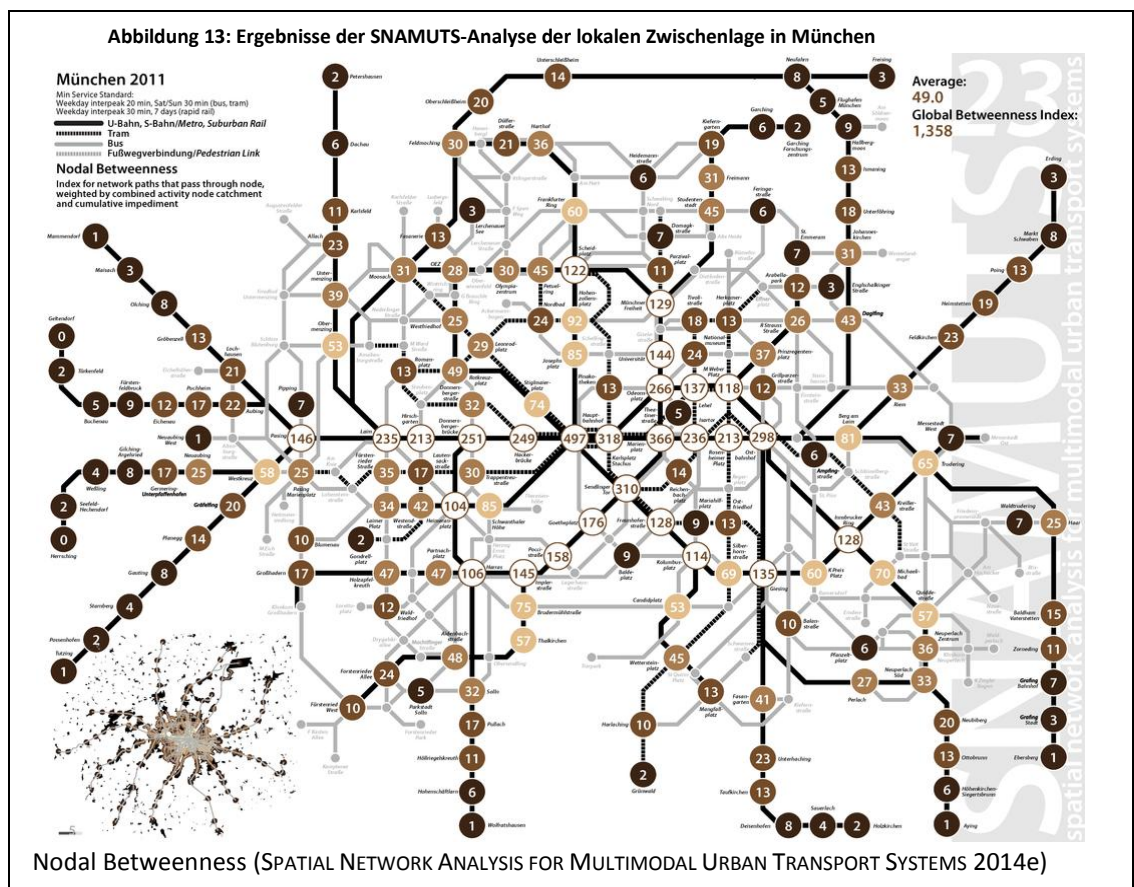


Umsteigeknoten fungieren können. München hat hier auf Grund mehrerer Faktoren Vorteile. Seine Größe sorgt per se schon für mehr Personen im System. Zudem ist durch Münchens relativ kompakte Stadtstruktur (wenig Nebenzentren) sowie die sparsame Ausstattung mit Infrastruktur und der radialen Ausrichtung auf die Innenstadt auch die Chance

größer, dass die städtischen Aktivitätszentren als Umsteigeknoten funktionieren (SCHEURER, 2013).

SCHEURER zieht das Fazit, dass München einen sparsamen Ansatz bei der Bereitstellung von ÖPNV-Leistungen verfolgt. Die Stadt versucht durch effiziente Netzgestaltung das finanzielle Engagement zu minimieren. Dies geschieht allerdings auf Kosten der Erreichbarkeit innerhalb der Stadt. Vor allem die Netzverknüpftheit ist weniger ausgeprägt als aus Fahrgastsicht wünschenswert. Die unterdurchschnittliche Verknüpftheit führt ebenso dazu,

dass die Netzbelastbarkeit und somit die Fähigkeit auf Stress zu reagieren, geringer ist. München schafft es folglich nicht bei Ausfall eines Verkehrsmittels attraktive Fahrtmöglichkeiten an zu bieten. Aus Sicht von SNAMUTS muss München die Takte im Schnellbahn-System deutlich verdichten. Der bestehende 10/20-Minuten-Takt hinkt dem -5/10-Minuten-Takt anderer Orte mit höherer Bedienintensität deutlich hinterher. Dies führt bereits auf der Ebene der Stadt München zu großen räumlichen Trennungen. Im Münchner Umland verschärft sich dieser Zustand durch den vorherrschenden 20/40-Minuten-Takt sogar noch weiter. In der Stadt München selbst fehlt es neben dichten Takten aber auch an tangentialen Linien, die die Erreichbarkeit innerhalb der Stadtviertel erhöhen. Diese können dazu beitragen, das überlastete Stadtzentrum von Umwegfahrten zu entlasten, sofern sie im gleichen Takt wie die radialen Linien, zur bestmöglichen Verknüpfung, betrieben werden (SCHEURER 2013). Der Indikator nodal betweenness zeigt dies für München. Sehr hohe Werte im Zentrum (Hauptbahnhof 497, Karlsplatz-Stachus 318 und Marienplatz 366) stehen einem Durchschnitt von lediglich 49,0 gegenüber (SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS 2014e).





## 7.4 GENERAL TRANSIT FEED SPECIFICATION ALS ANALYSEGRUNDLAGE

### 7.4.1 DEFINITION GTFS

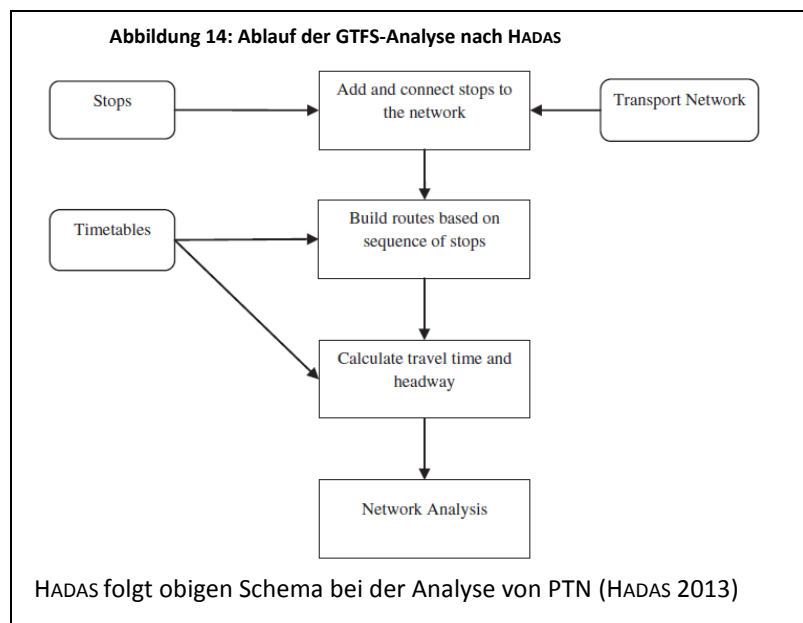
*General Transit Feed Specification* geht auf ein gemeinsames Projekt des Nahverkehrsunternehmens der Stadt Portland, Oregon in den USA, TriMet und Entwicklern von Google zurück. Im Jahr 2005 kehrte die TriMet-Angestellte BIBIANA MCHUGH von einer Reise zurück und war enttäuscht, dass sich Informationen über öffentliche Nahverkehrsmittel nicht genauso einfach wie Straßenpläne und Wegbeschreibungen im Internet einsehen und downloaden lassen. Sie kontaktierte daraufhin die Betreiber von Kartenportalen im Internet, wie Mapquest, Yahoo und Google. Lediglich letzterer zeigte sich interessiert und die Entwickler CHRIS HARRELSON und AVICHAL GARG stiegen ein. In den ersten Jahren nahmen nur wenige Städte, die Möglichkeit ihre Daten bzw. ihr Angebot in Google Maps anzubieten wahr. Nur nach und nach zogen die Städte bzw. die Verkehrsbetriebe mit (TRIMET o.A., ROTH 2010, CHAN 2008, ROTH 2010). Das anfangs als „*Google Transit Feed Specification*“ bezeichnete Projekt hat sich inzwischen laut FERRIS als „de-facto-Standard“ durchgesetzt (FERRIS et al. 2010). Den Erfolg begründet CATALA (CATALA 2011) vor allem mit der transparenten Dokumentation, der zugrundeliegenden Logik und der Anwendbarkeit der Daten. Zudem sind interessierte Nutzer beteiligt, in dem sie Ideen einbringen können und sofern diese für nützlich befunden werden, von Google eingebaut werden. Ein GTFS-Feed besteht aus einer Sammlung von CSV-Dateien (Endung txt) und umfasst Angaben zumindest zu Verkehrsbetrieb, Haltestellen, Routen, Fahrten, Fahrtenangebot (besteht aus den Haltezeiten jeder Station und einer Kalenderdatei, die den Umfang für jeden Tag angibt). Darüber hinaus sind noch weitere Angaben mit den dazugehörigen Datenanforderungen definiert (GOOGLE 2014). Es zeigt sich dabei, dass viele Städte bzw. Verkehrsbetriebe zwar bereit sind mit Google zu kooperieren, ihre Daten aber nicht frei zugänglich sind. Ein Vergleich zwischen den teilnehmenden Städten/Betrieben (GOOGLE o.J.) und den verfügbaren Feeds zeigt dies (GOOGLE PROJECT HOSTING 2014).

### 7.4.2 EINSATZ VON GTFS ZUR ANALYSE VON ÖPNV-NETZEN

HADAS und HADAS und RANJITKAR (HADAS 2013, HADAS & RANJITKAR 2012) bemängeln, dass bei vielen Methoden zur Analyse von öffentlichen Nahverkehrsnetzen ein Einsatz von großen Datenmengen und Software nötig ist. Zudem sei die Datenakquise außerordentlich anspruchsvoll, da verschiedenste Quellen angezapft werden müssen. HADAS schlägt daher einen Analyse-

ansatz vor, der nur das ÖV-Netz und die dazugehörige Infrastruktur benötigt. Er geht dabei nach einem 4 Punkte-Schema vor. Er ermittelt zum einen den räumlichen Umgriff (1) des ÖV-Netzwerks, d.h. in welchem Gebiet ein ÖV-Angebot gemacht wird und zusätzlich den zeitlichen Umfang (2) des Angebots. Darüber hinaus spielt die Informationsvermittlung (3) an die (potenziellen) Kunden eine wichtige Rolle. Als letzter Größe wird die Kapazität (4) analysiert. Um das von HADAS an SNAMUTS, isochrone approach (O’SULLIVAN et al. 2000) oder dem Dijkstra-Algorithmus-Ansatz (LEI & CHURCH 2010) bemängelte Problem der Abhängigkeit von Daten zu entgehen, greift HADAS lediglich auf GTFS und frei verfügbare Daten, wie zum Beispiel OpenStreetMap, zurück. Dies löst nach seiner Meinung auch das Problem der Vergleichbarkeit der Daten, da GTFS-Daten alle nach dem gleichen Muster erstellt und ausgegeben werden (HADAS 2013, HADAS & RANJITKAR 2012).

Die ersten beiden Faktoren sind die wichtigsten, da sie die Konnektivität des Systems bestimmen. Diese ist sowohl durch die räumliche Struktur als auch die zeitliche Dimension



(Fahrt-, Umsteige- und Wendezeit) des Angebots bestimmt. Es zeigt sich, dass sich das Ziel ihrer Analyse, die Bestimmung von Konnektivität, also nicht von dem anderer Wissenschaftler unterscheidet (HADAS 2013, HADAS & RANJITKAR

2012). Dabei folgen HADAS sowie HADAS und RANJITKAR dem nebenstehenden Schema. Sie erstellen ein Verkehrsnetzwerk und einen Haltestellen-Layer, die dann miteinander verknüpft werden. Aus den Haltestellen und ihrer genauen Abfolge werden die Linien erstellt. Im nächsten Schritt werden aus den Fahrplandaten die Fahrzeugfolgezeiten und die Fahrtenhäufigkeit berechnet. Die Netz-Analyse schließt diese Vorgehensweise ab, indem mit Hilfe der räumlichen und zeitlichen Daten die verschiedenen Konnektivitätsindikatoren ermittelt werden. Diese Indikatoren sind laut HADAS:

1. **Transport network coverage level** zeigt an, wie sich die Fahrzeuge in einem Netzsektor bewegen.

2. **Transport network speed** als die Geschwindigkeit mit der sich Fahrzeuge im System bewegen.
3. **Intersection coverage indicator** zeigt den Fluss von Fahrzeugen an Kreuzungen an und gibt damit Auskunft darüber, ob Busse und Bahnen an gewissen Kreuzungen bevorrechtigt werden sollten.
4. **Stop-transfer potential indicator** zeigt die Umsteigesituation an. Umstiege sind in PTN üblich, schränken aber den Komfort für den Nutzer ein und können ein Hindernis für die Nutzung des ÖPNV darstellen.
5. **Route overlap indicator** zeigt die überlagernden Linien an, wobei HADAS der Meinung ist, dies sollte möglichst selten der Fall sein (HADAS 2013).

HADAS und HADAS und RANJITKAR haben ihre Indikatoren und Analyseverfahren auf die Städte Vancouver (Kanada), Auckland (Neuseeland) und Portland (Oregon, USA) angewendet. Es ließen sich dabei Unterschiede im räumlichen Umgriff und der Geschwindigkeit des ÖPNV feststellen. Auch bei den Indikatoren *stop-transfer potential* und *route overlap* zeigten sich die Eigenheiten der verschiedenen Untersuchungsgebiete. So hat zum Beispiel Portland trotz seiner eigentlich guten Ausgangslage auf Grund der Gitternetzstruktur, nicht die besten Konnektivitätswerte, da die erreichten Geschwindigkeiten im Vergleich zu den anderen Städten nicht attraktiv waren. Das Modell hat allerdings nur eingeschränkte Aussagekraft, da es sehr auf die Bedienung mit Bussen ausgelegt ist und die Multimodalität von ÖV-Netzen ausblendet (HADAS 2013, HADAS & RANJITKAR 2012).

## 7.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorgestellten Projekte, SNAPTA sowie SNAMUTS und die Nutzung von GTFS-Daten liefern eindrucksvolle Ergebnisse. Diese basieren aber nur teilweise auf dem Einsatz eines GIS-Systems. Zwar nutzen sie den vollen Umfang an GIS-Analysewerkzeugen, sie fußen aber dennoch auf einer starken Datengrundlage. Zum Teil scheint die Beschaffung der Daten und deren Pflege die eigentliche Analyse vom Arbeits- und Zeitaufwand deutlich zu übersteigen. Allerdings wird dies weder von KAROU und HALL noch von CURTIS und SCHEURER bei ihren Projekten als größeres Hindernis dargestellt (HULL & KAROU 2012, KAROU & HULL 2012, CURTIS et al. 2012b, SCHEURER 2013). Vor allem SNAMUTS und SNAPTA zielen darauf ab, mehr als nur Beschreibungen von ÖPNV-Netzen zu liefern. Sie integrieren die Landnutzungsformen im Einzugsbereich der Haltestellen um Aussagen über die Attraktivität von Destinationen zu treffen. Diese Daten sind zum Teil nicht zugänglich bzw. nicht kostenfrei. Des Weiteren ist die Beschaffung, Einarbeitung und Pflege der Daten aufwendig. Diese Arbeit wird bei SNAMUTS von einem fünfköpfigen Team an der Universität Melbourne übernommen (SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTI-

MODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS 2014c), das zudem noch Unterstützung aus den jeweiligen Untersuchungsregionen erhält (SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS 2014d). Andere Modelle wie SNAPTA haben diese personelle Ausstattung nicht. Viele andere Modelle werden daher zumeist nur auf eine Untersuchungsregion angewandt. Nichtregierungsorganisationen fehlt zum einen die personelle Ausstattung<sup>17</sup> und zum anderen teilweise auch die Unterstützung der Dateninhaber (VERWALTUNGSGERICHT POTSDAM 2014).

---

<sup>17</sup> Im BUND arbeiten auf Bundesebene drei Personen im Referat Städtebau, Raumordnung, Verkehr. Der WWF Deutschland besitzt überhaupt keine eigene Abteilung (WORLD WIDE FUND FOR NATURE 2015, BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND 2015).

## 8 OPENDATA UND FREI VERFÜGBARE DATEN IN DER ANALYSE

Auch wenn GIS-Systeme generell ihre Fähigkeit Verkehrsnetze zu analysieren unter Beweis gestellt haben, so bleibt dennoch die Frage offen, ob dies auch mit den limitierten Ressourcen von Nichtregierungsorganisationen zu bewerkstelligen ist. Der fehlende Zugang zu Daten und die mangelnde personelle Ausstattung, die eine umfassende Datenakquise unterbindet, führen dazu, dass auf frei verfügbare Daten zurückgegriffen werden muss. Es stellt sich aber die Frage, was unter „freien“ und „frei verfügbaren“ Daten verstanden werden kann. Bevor die Eignung der Daten für Analysezwecke untersucht wird, muss vorher geklärt werden, um welche Art von Daten es sich handelt. Die Begriffe „freie Daten“ und „offene Daten“ werden in dieser Arbeit synonym gebraucht.

### 8.1 DEFINITION UND ABGRENZUNG

#### 8.1.1 DEFINITION VON OPENDATA

Im vorherigen Absatz wurde beschrieben, warum Umweltverbände auf offene Daten oder Open Data angewiesen sind. Es stellt sich aber die Frage, was der Begriff Open Data umfasst. LUCKE und GEIGER definieren dies wie folgt: „Offene Daten sind sämtliche Datenbestände, die im Interesse der Allgemeinheit der Gesellschaft ohne jedwede Einschränkung zur freien Nutzung, zur Weiterverbreitung und zur freien Weiterverwendung frei zugänglich gemacht werden“ (LUCKE & GEIGER 2010). Dabei ist freie Zugänglichkeit aber nicht gleichbedeutend mit einem kostenlosen Zugang. Die veranschlagte Summe darf dabei lediglich die Reproduktionskosten nicht übersteigen. Diese Definition schließt von Regierung oder Verwaltung erhobene Daten bereits ein. Trotzdem gehen LUCKE und GEIGER auf diese gesondert ein. Daten von Wissenschaftlern, Privatpersonen oder Firmen sind nicht zwangsläufig mit öffentlichen Finanzmitteln (Steuern) erhoben worden. Die Datenbestände von Verwaltung und Regierung sind hingegen über Steuern bereits von der Öffentlichkeit finanziert. Für diese sollten folglich strengere Regeln gelten. LUCKE und GEIGER fordern, dass amtliche Daten, also mit Steuergeld erhobene Daten, vollständig, aktuell, leicht zugänglich, diskriminierungsfrei und maschinenlesbar bereit gestellt werden. Auch die Primärquelle muss wie die Dauer des Vorhaltens benannt werden, wobei eine Archivierung vorgesehen werden sollte. Die Verwendung offener Standards sowie geringe Lizenzierungshemmnisse (z.B. lediglich Nennung der Quelle ohne Vorgabe) vereinfachen die Nutzung amtlicher Datenbestände. Am wichtigsten aber dürfte der Verzicht auf Li-

zenzgebühren sein, da dies einem größeren Nutzerkreis erlaubt, Daten für eigene Zwecke einzusetzen (LUCKE & GEIGER 2010, LOENEN & ONSRUD 2004, BUNDESZENTRALE FÜR POLITISCHE BILDUNG 2011)

---

### 8.1.2 ABGRENZUNG ZU ANDEREN DATENBESTÄNDEN

Neben offenen Daten, die explizit im Interesse der Allgemeinheit veröffentlicht werden (MÜNCHEN o.J.), gibt es aber weitere Daten, die bei Analysen von großem Nutzen sein können. In dieser Arbeit wird dabei auf Fahrplandaten von MVG und S-Bahn-München und die Meldungen der S-Bahn-München aus dem Jahr 2014 zurückgegriffen. Diese Daten sind keine offenen Daten. Sie werden von den Inhabern nicht nach den Vorgaben für Offene Daten herausgegeben. Ganz im Gegenteil, es sehen weder die Münchner Verkehrsgesellschaft (MVG) noch der Münchner Verkehrs Verbund (MVV) überhaupt die Notwendigkeit, die Daten bereit zu stellen. Lediglich Google wird von der MVG mit Daten nach dem GTFS-Standard beliefert (REITER 2013, MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2012).

Die von den Verkehrsunternehmen publizierten Daten, wie Fahrpläne oder Störungsmelder, dienen der Information ihrer Kunden. Sie sind daher mit einer niedrigen Zugangshürde ausgestattet. Der Fahrplan hängt an jeder Station bzw. ist im Internet abrufbar (MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT o.J.a). Der sogenannte Streckenagent der S-Bahn-München benachrichtigt per E-Mail über Störungen auf den Strecken der S-Bahn, Baustellen oder anderen betriebsbedingten Änderungen (S-BAHN MÜNCHEN o.J.). Diese für den Kunden nützlichen Informationen können aber nicht direkt in ein GIS übernommen werden. Der jeweilige Nutzer muss die Daten zu allererst einmal sammeln, dann ordnen und zudem eingeben. Dieser Schritt ist zeitintensiv und bedeutet eine hohe Bindung von Arbeitskraft, noch vor Beginn der eigentlichen Analyse. Dennoch können diese Daten wertvoll sein. Ihre Genauigkeit und Qualität ist als sehr hoch einzuschätzen. Die ausgegebenen Daten dienen der Kundenakquise bzw. Kundenbindung und beeinflussen direkt die Akzeptanz und die Zufriedenheit des Fahrgasts (DZIEKAN & KOTTENHOFF 2007, DRDLA 2006, PALMA & LINDSEY 2001).

## 8.2 OPENDATA: FREIWILLIGE BETEILIGUNG UND DATENQUALITÄT

Ein schon angesprochenes aber nicht ausführlich behandeltes Feld von Open Data wird als **Volunteered Geographic Information** kurz VGI (ELWOOD et al. 2012) bezeichnet<sup>18</sup>. Es handelt sich um mehr oder wenig freiwillig gegebene räumliche Information. Daher wird VGI in zwei Kategorien aufgeteilt. Zu dieser Gruppe von Open Data gehören zu einen auch Informationen, die vom Einzelnen, ohne die Absicht räumlich verortete Daten zu Analysezwecken zu kreieren, weitergegeben werden. Hierzu zählen beispielsweise Daten, die aus sozialen Medien wie facebook, Hangouts oder anderen mitgeliefert werden (ARRIBAS-BEL 2014, JACKSON et al. 2013). HARVEY bezeichnet diese Form räumlicher Daten als „contributed“ (HARVEY 2013). Dem gegenüber steht aus seiner Sicht „volunteered information“ (HARVEY 2013). Diese Daten werden vom Einzelnen explizit kreiert, um sie mit anderen zu teilen. Das wohl bekannteste Projekt zur Sammlung und Aufbereitung räumlich verorteter Daten ist OpenStreetMap (OSM). Seit 2004, als STEVE COAST begann Geodaten mit Hilfe von GPS-Geräten selbst zu erheben, da er für ein Projekt keine Daten aus freier Quelle finden konnte, kartieren Freiwillige<sup>19</sup> die Erde, um eine gemeinfreie Karte zu erstellen und somit den bei Geodaten kommerzieller Anbietern immanenten Lizenzproblematik zu entgehen (LOENEN & ONSRUD 2004, ZIELSTRA & ZIPF 2010, RAMTHUN 2012, OPENSTREETMAP - DEUTSCHLAND o.J.b, OPENSTREETMAP - DEUTSCHLAND o.J.b). Sie erhalten dabei teilweise Unterstützung von staatlichen Stellen oder privaten Anbietern, wie beispielsweise Yahoo (bis 2011) oder Bing (NEIS et al. 2013, COAST 2010, KIMCHI 2013). Ein reines Abzeichnen der Daten, beispielsweise Digitalisierung von Google Maps, wird durch die bestehende rechtliche Situation unterbunden. Allerdings wirft die ursprüngliche Methode der Datenerfassung mittels GPS die Frage nach der Qualität der frei nutzbaren Daten auf. Die Zusammenarbeit mit Bing und anderen Diensten sollte aber zu einer höheren Genauigkeit beitragen haben.

<sup>18</sup> Auf die Diskussion um die Abgrenzung zwischen und die Bedeutungsentwicklung der Felder Neographie, collaborative mapping und VGI wird hier nicht näher eingegangen. Einen Überblick dazu gibt LECHNER (LECHNER 2011).

<sup>19</sup> COLEMAN, GEORGIADOU und LABONTE unterscheiden fünf verschiedene Typen von Freiwilligen. **Neophytes** sind dabei Interessierte ohne jeglichen Hintergrund, der **Interested Amateur** interessiert sich bereits für das Thema und hat sich mit den Grundlagen vertraut gemacht. Als nächster folgt der **Expert Amateur**, er hat noch deutlich mehr Wissen und investiert auch mehr Zeit. Als letzte Stufen folgen noch der **Expert Professional**, der sich bereits wissenschaftlich bzw. beruflich mit dem Thema beschäftigt hat und die Gruppe, die als **Expert Authority** bezeichnet werden kann, da sie seit Langem auf hohem Niveau in diesem Themengebiet unterwegs ist und sich eine hohe Reputation aufgebaut hat (COLEMAN et al. 2009).

### 8.3 QUALITÄT FREIER DATEN

Ein entscheidendes Kriterium für die Qualität der Analyse liegt in der Qualität und Eignung der verwendeten Daten. Dazu kommt bei der räumlichen Betrachtung auch immer das Manko der Lagegetreue. ZHANG und GOODCHILD beschreiben dieses Problem. „Geographic information is subject to measurement error, loss of detail, vagueness of definition and many other sources“ (ZHANG & GOODCHILD 2002). Die Übertragung von Punkten in Datenbanken anhand von Koordinatensystemen und deren Ausgabe auf verschiedensten Maßstäben führt also per se bereits zu einer gewissen Ungenauigkeit. Nur Daten die ohne diesen Raumbezug bestehen, besitzen diesen Nachteil nicht.

Während den von Verwaltungen bzw. Regierungen sowie von privaten Anbietern erstellten Geodaten, wie Gebäudekataster oder Topographische Karten bzw. Navigationssoftware wie TeleAtlas, ein hohes Maß an Lagegenauigkeit und Vollständigkeit attestiert wird, werden Open Data Bestände diese Attribute immer wieder abgesprochen. Zum einen liegt dies in der bereit angesprochenen Aufnahme von Features mittels GPS und den damit einhergehenden Ungenauigkeiten je nach Qualität des benutzten Geräts. Auch die Digitalisierung von Luftbildern führt nicht immer zu genauen Ergebnissen. Hier spielt ihre Auflösung eine große Rolle. Zu guter Letzt kommt bei VGI noch die fehlende Dokumentation, also die Vergabe gleicher Attribute für Gleiches und das Fehlen von Metadaten hinzu. Die Bereinigung und Überprüfung der Daten kann also einen gewissen Aufwand bedeuten (ELWOOD et al. 2012, JACKSON et al. 2013, FLANAGIN & METZGER 2008). Im Folgenden wird anhand des Beispiels OpenStreetMap aufgezeigt, welche Qualität frei verfügbare Geodaten erreichen können

### 8.4 DAS BEISPIEL OPENSTREETMAP

Das wohl bekannteste und größte Beispiel für frei verfügbare Geodaten ist das im Jahr 2004 gegründete Projekt OpenStreetMap. Es hat sich zum Ziel gesetzt möglichst genaue, frei verfügbare und editierbare Karten der Erde zu erstellen (OPENSTREETMAP - DEUTSCHLAND o.J.a). Dabei stehen zumeist die Geodaten bzw. Geodatenbanken der staatlichen Stellen (z.B. Vermessungsämter) und kommerzieller Anbieter nicht zur Verfügung. D.h., dass jedes Feature im schlimmsten Fall per Hand oder GPS eingetragen werden muss. Folglich sind Lücken und fehlende Features im Projekt zwangsläufig zu erwarten. Zudem beruht die Mitarbeit auf Freiwilligkeit und die Mapper agieren im Rahmen ihrer verfügbaren Zeit sowie Lust und Laune (COLEMAN et al. 2009, ELWOOD et al. 2012). Dies hat zur Folge, dass die Erstellung nicht nach festge-



legten Regeln, wie bei kartographischen Erzeugnissen von Verwaltung oder Privatwirtschaft, abläuft. Die Kontrollmechanismen liegen nicht in der Hand Einzelner oder werden durch die Art der Attribuierung bestimmt, sondern kommen aus der Menge der aktiven Nutzer. „Instead of review by experts against established standards, crowd sourcing substitutes review by varying number of peers” (ELWOOD et al. 2012). Darin aber sieht JACKSON wiederum eine Stärke von OSM. Anstatt Daten nur sporadisch oder in wiederkehrenden Intervallen zu überprüfen, ist die Menge an aktiven Nutzern (Mappern) sowohl theoretisch als auch praktisch in der Lage, jede Veränderung in der realen Welt sofort in die Datenbank einzupflegen bzw. sollten Features durch ständiges Überprüfen immer genauer verortet werden (JACKSON et al. 2013). Das große Interesse an und die Mitarbeit in OpenStreetMap lassen sich auch durch die Zahl der Nutzer belegen. Innerhalb von weniger als zehn Jahren, zwischen der Gründung von OSM im Jahr 2004 und Januar 2013, stieg die Zahl der registrierten Benutzer auf mehr als eine Million. Damit stieg auch die Zahl der Daten (ZIELSTRA et al. 2013).

---

#### 8.4.1 ABWEICHUNG BEI PUNKT-FEATUREN

Mehrere Studien haben sich mit der Genauigkeit bzw. Vollständigkeit von OpenStreetMap-Datenbeständen im Vergleich zu amtlichen oder privaten Geodatenbeständen auseinandergesetzt. So kommen JACKSON, MULLEN, AGOURIS, CROOKS, CROITORU und STEFANIDIS (JACKSON ET AL. 2013) bei ihrer Untersuchung von Schulstandorten im Raum Denver, Colorado, zu einem auf den ersten Blick ernüchternden Ergebnis. Nur 70 Prozent aller Schulen, die in einem offiziellen Verzeichnis räumlich verortet sind, waren auch in OpenStreetMap vorhanden. Zudem wiesen diese zum Teil erhebliche Abweichungen zu den tatsächlichen Standorten auf<sup>20</sup>. Besser als die reinen VGI-Datenbestände von OSM war eine Hybridvariante. Hier kartierten Studenten unter Beratung von Spezialisten des United States Geological Survey (USGS) das Untersuchungsgebiet. Diese Daten umfassen 90 Prozent der amtlichen Vergleichsstatistik. Hierbei zeigte sich auch, dass die amtlichen Bestände zum Teil veraltet waren und das Nachführen in festgelegten Zyklen der amtlichen Datenbank einen Nachteil gegenüber OSM bedeuten kann. JACKSON kommt zum Schluss, dass OpenStreetMap durchaus eine Alternative, wenn auch eine fehlerbehaftete, zu proprietären Geodaten-Anbietern sein kann (JACKSON et al. 2013).

---

<sup>20</sup> Allerdings waren auch die amtlichen Statistiken hier nicht lagegetreu. Die Adressdaten wurden im GI-Programm automatisch an die nächste Straße gefangen, ohne die tatsächliche Lage der Gebäude zu beachten.

#### 8.4.2 VOLLSTÄNDIGKEIT VON LINE-FEATURES IN OSM

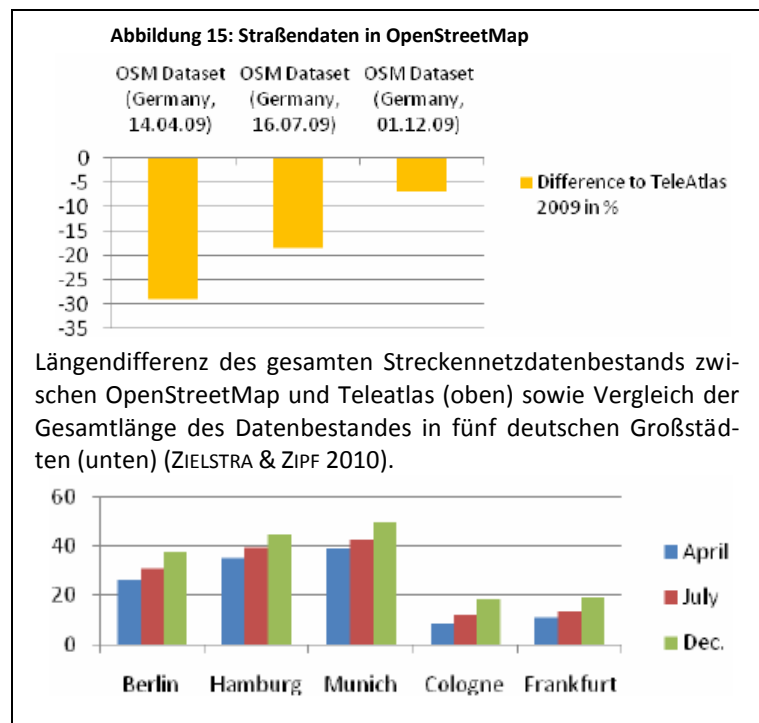
Allerdings spielt sich diese Untersuchung in den USA ab und hat daher für Deutschland nur eine geringe Aussagekraft. ZIELSTRA und ZIPF haben sich näher mit den in OSM abgebildeten Straßennetzen in Deutschland beschäftigt (ZIELSTRA & ZIPF 2010). Ihre Untersuchung aus dem Jahr 2010 zeigt, dass OpenStreetMap vor allem in Großstädten einen hohen Datenbestand besitzt und damit als Alternative zu privaten, kommerziellen Anbietern darstellt. Ihre Ergebnisse fußen zum einen auf dem Vergleich des gesamten deutschen Straßennetzes von OSM und Teleatlas. Es zeigte sich, dass OpenStreetMap im Untersuchungszeitraum (Jahr 2009) stark aufholen konnte. Mitte April war das OSM-Straßennetz noch um 29 Prozent kürzer als das des privaten Anbieters. Am 01.12.2009 hingegen fehlten OSM nur noch 9 Prozent, um gleich zu ziehen. Beim Vergleich der

Großstädte, dem zweiten Teil ihrer Untersuchung, zeigte sich von Beginn an ein anderes Bild. In den Großstädten Berlin, Hamburg, München, Köln und Frankfurt am Main war das in OSM verzeichnete Straßennetz bereits umfassender. Der Vorsprung vergrößerte sich bis Dezember 2009 weiter. ZIELSTRA und ZIPF führen dies auf die Besonderheit von OSM zurück, die Be-

lange von Fußgängern, also Durchgänge zwischen Häuserzeilen oder Pfade und kleine Seitenstraßen, zu integrieren, wohingegen TeleAtlas auf das Routing von Kraftfahrzeugen setzt. ZIELSTRA und ZIPF schränken aber ein:

*OSM data now has a larger length of street networks - which means it offers more data in these specific areas than does the commercial provider. This, of course, does not yet say anything about the quality of the data at the attribute level or the geometric precision or the homogeneity according to different object types; however, it does provide a first impression about the potential of VGI and OpenStreetMap (ZIELSTRA & ZIPF 2010).*

Die beiden Autoren unterstellen damit OSM-Datensätzen trotz ihrer höheren Vollständigkeit weiterhin neben fehlender oder falscher Attribuierung ein Lageungenauigkeitsproblem. Aber

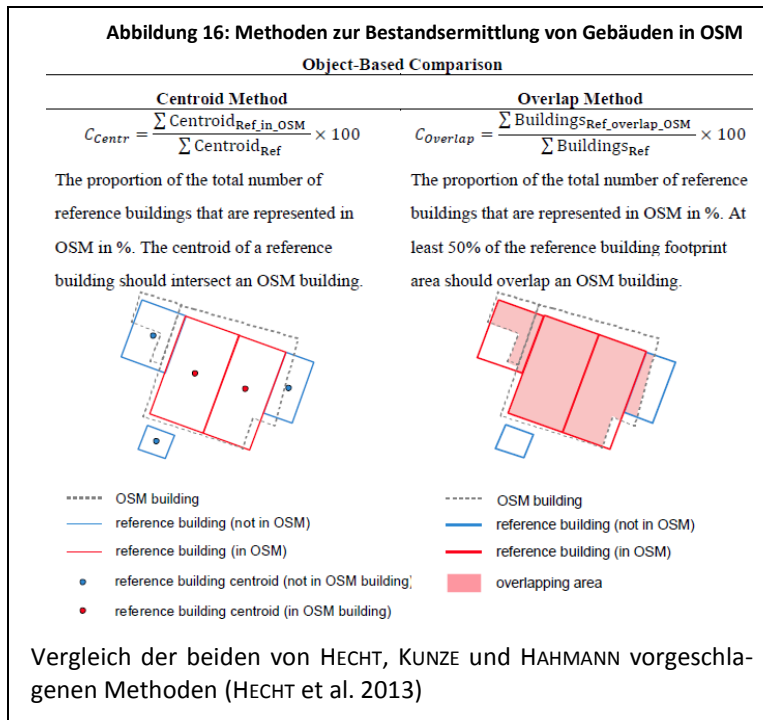


die Untersuchung zeigt auch, dass vor allem in Großstädten mit einer hohen Zahl von aktiven Nutzern die Vollständigkeit der Daten möglich ist. Allerdings gilt die Untersuchung von ZIELSTRA und ZIPF nur für Bestand an Straßennetzdaten (ZIELSTRA & ZIPF 2010, NEIS et al. 2013).

#### 8.4.3 POLYGONBESTÄNDE IN OPENSTREETMAP

Neben der Analyse der rein verkehrlichen Gegebenheiten eines Nahverkehrssystems soll aber auch die Erreichbarkeit betrachtet werden. Diese schließt die jeweilige Landnutzung im Umgriff einer Haltestelle ein, da diese die Attraktivität des Ziel definiert. Die verwendeten Daten sollten hierbei ebenso genau räumlich verortet, aktuell und vollständig sein, wie bei den Punkt- und Line-Features, z.B. Haltestellen und Nahverkehrslinien. Es stellt sich die Frage, inwieweit die OpenStreetMap-Daten dies leisten können. Es wird im Folgenden erläutert, welche Fortschritte OpenStreetMap bei den Polygonbeständen bereits verzeichnet und welche Einschränkungen noch bestehen. Zum einen wird auf den Gebäudebestand eingegangen. Dieser kann bei der Ermittlung der Erreichbarkeit hilfreich sein, indem er anzeigt, welche Häuser sich im Einzugsbereich einer Haltestelle liegen oder welche weniger gut angebunden sind. Landnutzung wird aufgegriffen, da diese über die Attraktivität von Quell- und Zielregionen Auskunft gibt.

Mit dem Problem der Vollständigkeit weiterer Features jenseits von Straßengraphen befassen sich HECHT, KUNZE und HAHMANN in ihrer Studie „Measuring Completeness of Building Footprints in OpenStreetMap over Space and Time“ (HECHT et al. 2013). Sie zweifeln an dem von Goetz und Zipf genannten Anteil von 30 Prozent bereits erfasster Gebäude in OSM am gesamtdeutschen Gebäudebestand (GOETZ & ZIPF 2012). HECHT, KUNZE und HAHMANN gehen von einer deutlich niedrigeren Quote von nur rund 13 Prozent aus. Ihre Zahl stammt aus dem Vergleich der in OSM erfassten Gebäude von 6,5 Millionen mit den 50 Millionen Umrisspolygonen aus dem Datenbestand der Amtlichen Hausumringe (HU). Den Unterschied zwischen ihrer Schätzung und der von GOETZ und ZIPF führen sie auf die fehlende Standardisierung bei der Erfassung von Gebäuden durch OSM-Mapper und die damit verbundene Anwendung verschiedener Techniken zurück. So gehen HECHT, KUNZE und HAHMANN davon aus, dass viele Gebäude in OSM mit weniger Details als in der amtlichen Datenbank eingetragen bzw. Gebäudegruppen bewusst oder unbewusst als Einheit betrachtet werden. Um nun fest zu stellen, in wie weit die Gebäude tatsächlich bereits in OpenStreetMap verzeichnet sind, schlagen sie zwei Ansätze vor. Zum einen bilden sie die Zentroide der Vergleichsbestände, also der amtlichen Verzeichnisse, und untersuchen, ob diese in ein Gebäudepolygon in OSM fallen (Centroid Me-



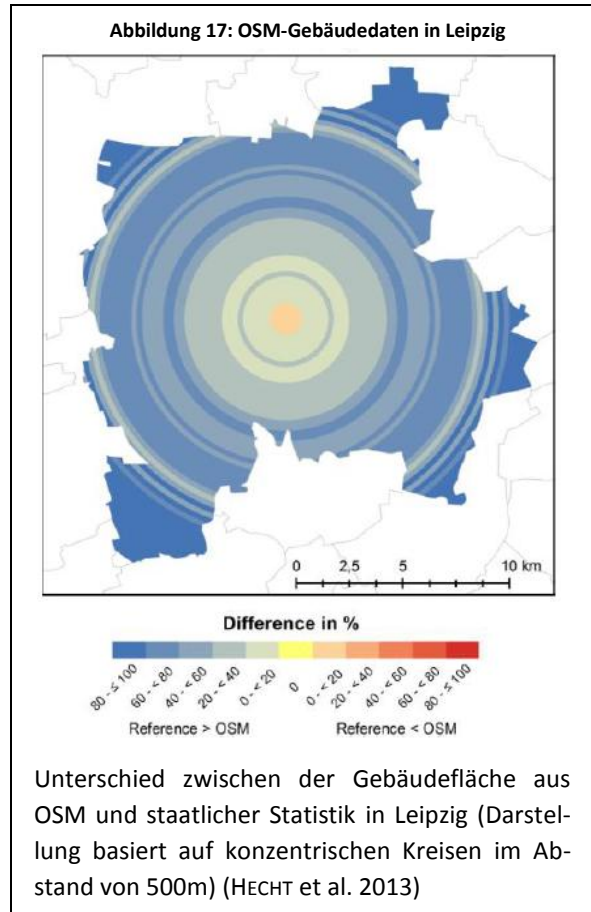
thod). Des Weiteren verschneiden sie im zweiten Ansatz (Overlap Method) die Polygonflächen der Gebäudebestände aus OSM und amtlicher Datenbank. Sobald 50 Prozent oder mehr der Fläche deckungsgleich liegen, gehen HECHT, KUNZE und HAHMANN davon aus, dass dieses Gebäude in OpenStreetMap referen-

ziert wurde (HECHT et al. 2013).

Die Untersuchung ländlicher, mittelstädtischer und großstädtischer Gebiete kam zu ähnlichen Ergebnissen wie ZIELSTRA und ZIPF (ZIELSTRA & ZIPF 2010) bei ihrer Untersuchung des Straßenbestandes. Es zeigte sich auch hier eine Benachteiligung ländlicher Gebiete. In diesen waren weniger als 25 Prozent des Vergleichsgebäudebestands aus der amtlichen Statistik verzeichnet, während Großstädte und Mittelstädte deutlich höhere Werte aufwiesen. Wobei sich auch bei diesen regionale Unterschiede zeigten. Die Centroid-Methode lieferte für Essen einen Wert von 53,5 Prozent erfasster Gebäude in OSM gegenüber dem amtlichen Bestand und lediglich einen Wert von 28,9 Prozent für Leipzig. Ähnliche Ergebnisse liefert auch die Overlap-Methode. Hier erreicht Essen einen Anteil von 52,5 und Leipzig von 28,4 Prozent. Laut HECHT, KUNZE und HAHMANN ist dieses Vorgehen korrekt im Gegensatz zum reinen Vergleich der gesamten Gebäudeflächen aus OSM und amtlicher Statistik. Das Referenzieren von Gebäudebestand anhand von GPS oder Digitalisierung führt dazu, dass die Dachfläche und nicht die Grundfläche eines Hauses aufgenommen wird. Diese Vermutung wird auch durch Untersuchungsergebnisse von GOETZ bestätigt, der feststellte, dass zum Zeitpunkt seiner Betrachtung 60 Prozent aller OSM-Gebäudepolygone mit nur vier Punkten modelliert wurden (GOETZ 2012). Würde (KUMAR et al. 2015) man allein diese Grundflächen miteinander verschneiden, so käme man zu deutlich besseren Werten. Im diesem Fall erreicht Essen eine 84,1-prozentige und Leipzig immerhin eine 58,8-prozentige Übereinstimmung. Aber nicht nur der Regionsvergleich zeigt Unterschiede, sondern auch innerhalb einer Stadt kommt es zur bereits von ZIELSTRA und

ZIPF (ZIELSTRA & ZIPF 2010) beobachteten Differenzierung. So übersteigt die gesamte Gebäudefläche aus OSM in der Leipziger Innenstadt die aus dem amtlichen Verzeichnis. Je weiter man sich vom Zentrum entfernt, desto größer ist die Diskrepanz in der Gebäudefläche zu Ungunsten von OpenStreetMap (HECHT et al. 2013).

Im Gegensatz zu den bisher aufgeführten Datenbeständen ist die wissenschaftliche Literatur zum Thema Landnutzung und Volunteered Geographic Information dünn gesät. So kommen JOKAR ARSANJAN, HELBICH, HAGENAUER und ZIPF (JOKAR ARSANJANI et al. 2013) zum Ergebnis, dass OpenStreetMap-Daten bei der Bewertung von Landnutzungen in der Stadt Wien



amtliche Daten unterstützen können, diese aber noch nicht völlig ersetzen. Einen anderen Ansatz verfolgen KUMAR, HEUTEN und BOLL (KUMAR et al. 2015). Sie stellen den Nutzer ins Zentrum ihrer Studie. Dieser soll seine Herangehensweise an räumliche Probleme schildern, so dass die Autoren in die Lage versetzt werden eine interaktive Schnittstelle zur Lösung zu entwickeln. Es wurden dazu verschiedene Szenarien entwickelt, wie z.B. die Annäherung an eine neue Umgebung nach einem Wohnortwechsel. Die Daten aus OSM dienen hierbei als Grundlage<sup>21</sup>.

HECHT, KUNZE und HAHMANN sehen OpenStreetMap in Deutschland aber genauso wie ZIELSTRA und ZIPF auf einem guten Weg (HECHT et al. 2013, ZIELSTRA & ZIPF 2010) zu einer starken Alternative zu proprietären Anbietern und amtlichen Verzeichnissen zu werden. Die hohe Zahl von aktiven Nutzern führt zu einem weiterhin hohen Wachstum an OSM-Geodaten und zu

<sup>21</sup> In this paper, we utilize OSM data to classify the characteristics of the urban environment and provide an interactive visual interface for the spatial exploration of this data and to support the spatial decision making of citizens. We extend our earlier interface to provide a more in-depth knowledge, structure and environment of the urban environment. The proposed system provides more user control and presents a search framework for multi-criteria regional querying, exploration and city-based comparison using OSM data. We enrich the spatial information with the topographic distribution of geographic areas of interest. We integrate efficient ranking methodologies to support the regional search process. In the proposed framework, users could compare the characterization of urban areas with respect to multiple spatial dimensions of interest and could search for the most suitable region (KUMAR et al. 2015).

einer Erhöhung der Datenqualität (HAYAKAWA et al. 2012, NEIS et al. 2013). ARRIBAS-BEL, LOENEN und ONSRUD und MOLLOY sehen dies auch als Vorteil für die Wissenschaft, da sie den Forschungsbetrieb davon befreit, Daten bei etablierten Anbietern, deren Geschäftsmodell auf dem Verkauf von Geodaten beruht, zu erwerben (ARRIBAS-BEL 2014, LOENEN & ONSRUD 2004, MOLLOY 2011). LOENEN und ONSRUD ergänzen, dass sie entgegen ihrer Annahme herausfanden, dass die Nutzer freier Daten im Vergleich mit Nutzern proprietärer Daten zufriedener mit diesen waren und mit freien Daten auch signifikant mehr Forschungsziele erreichten. Sie führen dies darauf zurück, dass freie Daten weniger limitiert sind als bereits bearbeitete bzw. auf eine Analyse hin ausgerichtete Geodatenpakete. Zudem nehmen sie an, dass Nutzer freier Daten auch einen geringeren Anspruch an diese stellen (LOENEN & ONSRUD 2004).

Abschließend lässt sich feststellen, dass offene Daten (hier OSM-Daten) vor allem bei den Punkt- und Linien-Datenbeständen in Großstädten ein hohes Niveau sowohl an Quantität als auch an Qualität erreicht haben. Der Einsatz freier Daten in der Wissenschaft lässt die Folgerung zu, dass beispielsweise OSM-Datenbestände in der Analyse räumlicher Phänomene verwendet werden können. Für das Untersuchungsgebiet München sollten ausreichend verlässliche Punkt- und Linien-Features vorliegen. Bei den Polygondatenbeständen, wie Gebäudebestand und Landnutzungsform hingegen, können für das Untersuchungsgebiet München lediglich die Daten zum Gebäudebestand als ausreichend umfassend und umfangreich angenommen werden. Diese Annahmen werden im nächsten Schritt überprüft.

## 8.5 GENAUIGKEIT VON OSM IM UNTERSUCHUNGSGEBIET

### 8.5.1 GENAUIGKEIT VON ÖPNV-FEATURES IN OSM

Um Daten für die Analyse verwenden zu können, müssen diese die Realität ausreichend genau abbilden. Zuerst allerdings müssen die Daten geladen werden. In der vorliegenden Arbeit wurden die Daten über den Anbieter Geofabrik (GEOFABRIK 2014a) bezogen. Dieser stellt kostenlos Auszüge aus OpenStreetMap zur Verfügung. In vorliegender Arbeit wurden der Datensatz vom 12. September 2014 für Oberbayern (GEOFABRIK 2014b) verwendet und auf die Features innerhalb der Grenzen der Stadt München<sup>22</sup> reduziert (Clip-Verfahren). Zur Feststellung der Lagegenauigkeit wurden die OpenStreetMap-Bestände mit den als Web Map Service (WMS)<sup>23</sup> zur Verfügung stehenden Digitalen Orthophotos mit einer Bodenauflösung von 2m

<sup>22</sup> Die Grenzen der Stadt München wurden den amtlichen Geodaten entnommen (BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG o.J.).

<sup>23</sup> URL des Dienstes: [http://www.geodaten.bayern.de/ogc/ogc\\_dop200\\_0a.cgi?](http://www.geodaten.bayern.de/ogc/ogc_dop200_0a.cgi?) (Version 1.1.1)

(BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG o.J.) verglichen. Neben der Genauigkeit ist für die Analyse auch die Übereinstimmung im Bestand wichtig. JACKSON, HECHT, KUNZE und HAHMANN sowie ZIELSTRA und ZIPF (HECHT et al. 2013, ZIELSTRA & ZIPF 2010, JACKSON et al. 2013) haben gezeigt, dass es zu Abweichungen zwischen den real bestehenden Objekten, wie Straßen und Gebäuden, und den in OSM-Datenbestand verzeichneten kommen kann. Es ist daher vor der Analyse wichtig, die OSM-Bestände sowohl auf Vollständigkeit als auch Lagegenauigkeit zu untersuchen.

### 8.5.2 WIEDERGABE VON PUNKT-FEATURES

Die Übereinstimmung variiert zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln. Die MVG gibt für das Jahr 2014 166 Trambahnhaltestellen an (MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2014a). Davon befinden sich 160 auf Münchner Gebiet und sechs auf Grünwalder Flur. Aus dem OSM

Ausgangsdatensatz müssen zuerst die nicht regelmäßig bedienten Haltestellen (Grillparzerstraße, Einsteinstraße und Kölner Platz) entfernt werden und dann die doppelt vorhandenen Haltestellen identifiziert werden (Barbarastraße und Hochschule München). Es ergibt sich eine Differenz um eine Haltestelle. Dies ist der Effnerplatz,

**Abbildung 18: OSM-Punkt datensatz**

18019	1507407645	2013-06-07T08:...	Eduard-Schmid-S...	platform
29947	3195960861	2014-11-19T18:...	Eduard-Schmid-S...	tram_stop
11835	722327316	2014-06-15T21:...	Edward&Son	fashion
21161	1813649254	2012-07-31T09:...	Edwards	hairdresser
12965	905586680	2012-01-20T00:...	Efeu Apotheke	pharmacy
10179	630808286	2014-10-10T16:...	Effnerplatz	platform
15856	1302910823	2014-10-03T10:...	Effnerplatz	bus_stop
21858	1876058932	2012-08-21T13:...	Effnerplatz	bus_stop
27863	2873552805	2014-08-18T13:...	Effnerplatz	bus_stop
27864	2873552806	2014-08-18T13:...	Effnerplatz	bus_stop
30206	3226678176	2014-12-09T16:...	Effnerplatz	bus_stop
3511	297163604	2009-08-05T12:...	Egenolf	mobile_phone
74669	2467823350	2014-12-06T19:...	Egger&€™s	restaurant

Unveränderter OSM-Datensatz (GEOFABRIK 2014b)

er wurde fälschlicherweise nur als Bahnsteig und nicht auch als Tramhaltestelle in das Datenpaket aufgenommen. Die Eduard-Schmid-Straße hingegen wurde sowohl als Bahnsteig als auch als Trambahn-Haltestelle aufgenommen (GEOFABRIK 2014b).

Während sich dieser Fehler bei den Trambahnen noch relativ leicht beheben lässt, wird es bei U-Bahnen und Bussen schwieriger. U-Bahnen-Haltestellen werden zum Teil als *subway* aber auch als *stations* geführt. Letztere beinhaltet auch die Stationen der S-Bahn. Daher müssen Datensätze der S-Bahnstationen als auch der U-Bahn-Haltestellen überarbeitet werden. Von den insgesamt 148 Haltestellen aus dem Ursprungsbestand (nur Typ *subway* und *station*) bleiben nach der Bereinigung 93 U-Bahn-Stationen übrig. Dies entspricht dann wieder der von der MVG genannten Anzahl (MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2014a). Diese nennen 100 U-Bahn-Haltestellen, wobei drei auf dem Gemeindegebiet Garchings liegen und die vier Kreuzungsbahnhöfe mit mehreren Ebenen, Sendlinger Tor, Odeonsplatz, Hauptbahnhof und Olympia-Einkaufszentrum (MÜNCHEN 2010), doppelt gezählt wurden. Schwieriger ist dieses Unter-

fangen beim Bus. Die MVG nennt 941 Bushaltestellen im gesamten Stadtgebiet, im Ausgangsdatensatz von OSM sind 1931 Haltestellen verzeichnet. Durch Streichen von mehrfach aufgeführten Haltestellen (z.B. je Richtung) verringert sich diese Zahl bereits massiv. Zudem sind einige Haltestellen in OSM ohne Namensnennung aufgenommen worden, diese wurden ebenfalls gestrichen. Insgesamt lassen sich 898 Haltestellen auf Münchner Stadtgebiet eindeutig identifizieren. Im Vergleich mit der MVG genannten Zahl von 941 Bushaltestellen entspricht dies einem Anteil von mehr als 95 Prozent. Die Überprüfung des Bestands von Punktdaten, wie hier der Haltestellen der MVG, ist noch relativ einfach, da jede Haltestelle eindeutig identifizierbar ist. Die eindeutige Benennung jeder Haltestelle entspricht den Bedürfnissen der Fahrgäste. Diese versetzt den Kunden in die Lage sein Ziel zu erreichen. Doppelte Namen innerhalb eines Nahverkehrssystems würden zu Verwechslungen und unzufriedenen Kunden führen. Dieser Umstand erleichtert die Überprüfung des Datenbestands.

Zur Überprüfung der Lagegenauigkeit wurden amtliche digitale Orthophotos, die von Bayerischen Vermessungsverwaltung per WMS bereitgestellt werden (BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG

o.J.), mit den OSM-Datenbeständen aus der Geofabrik verglichen. Es zeigt sich, dass die Daten aus OSM zumeist lagegetreu verortet sind, die Bestände aber trotzdem bei den Punkt-Features überprüft werden müssen. Zudem sind die meisten U-Bahn-Zugänge nicht mit

dem Namen der dazugehörigen Haltestellen versehen.





### 8.5.3 BESTAND AN LINIEN-FEATURES IN OSM

Wie auch bei den Punktrepräsentationen sind die Linien-Datenbestände nicht vollkommen fehlerfrei. Hier wird der Rotkreuzplatz für einen kurzen Nachweis herangezogen. Es sind zwar sowohl die U-Bahn-Strecken (hellblau) der U1 als auch der Bahnsteig der U1 (orange) verzeichnet, aber die Trambahnlinie 12 (rot) endet unvermittelt an der Landshuter Allee. Sie führt aber entlang der Leonrodstraße weiter nach Osten. Bizzarrerweise wurde zwar die Wendeschleife am Olympiapark in das Datenpaket aufgenommen, die diese ans Netz anbindende Trambahnlinie 12 fehlt in diesem Abschnitt aber. Zur Erstellung eines Netzwerks müssen

Abbildung 20: Fehlerhafte Linien-Features in OSM



Bei den OSM-Daten fällt die unvermittelt endende Tramlinie 12 auf. Es fehlt dabei auch die Anbindung an die Wendeschleife am Olympiapark (GEOFABRIK 2014b, BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG O.J.).

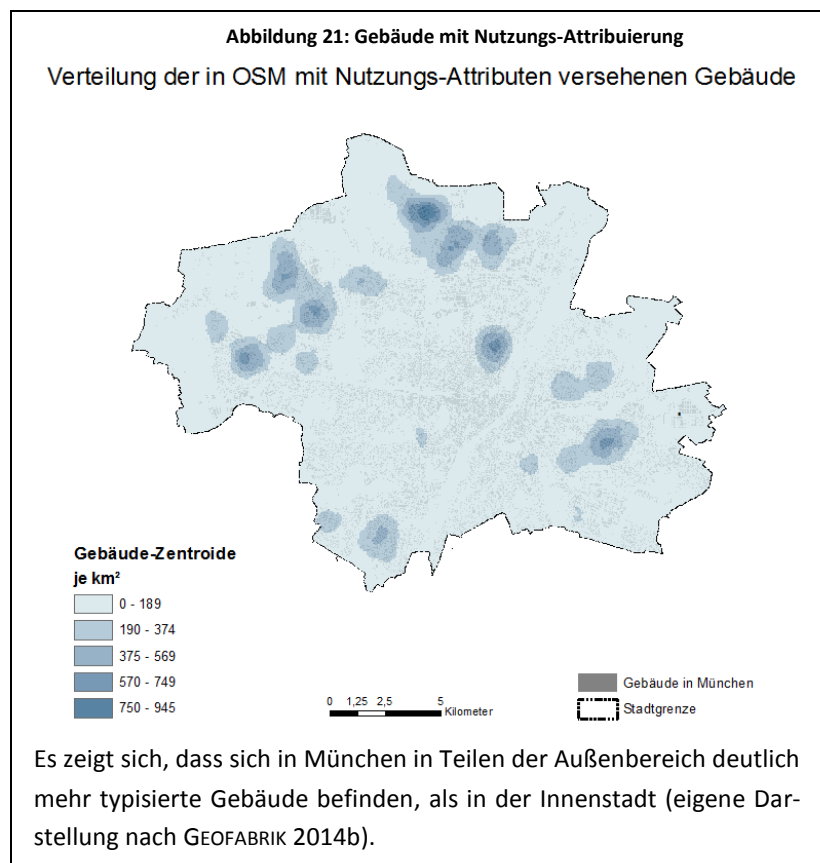


die Daten aus OSM überprüft werden. Das Weglassen oder Brechen einer Strecke wird bei einer Netzwerkanalyse zu zum Teil weitläufigen und zeitintensiven Umwegfahrten führen. Vor allem die hier betroffene Tram 12 als tangentielle Linie dürfte sich erheblich auswirken. Hier zeigt sich, dass für die Nutzung von OpenStreetMap-Daten aus der Geofabrik Kenntnisse über die lokalen Gegebenheiten zwingend vorhanden sein müssen. Eine Überprüfung anhand des Namens ist hier im Gegensatz zu den Punkt-Daten, wie Haltestellen nicht mehr möglich.

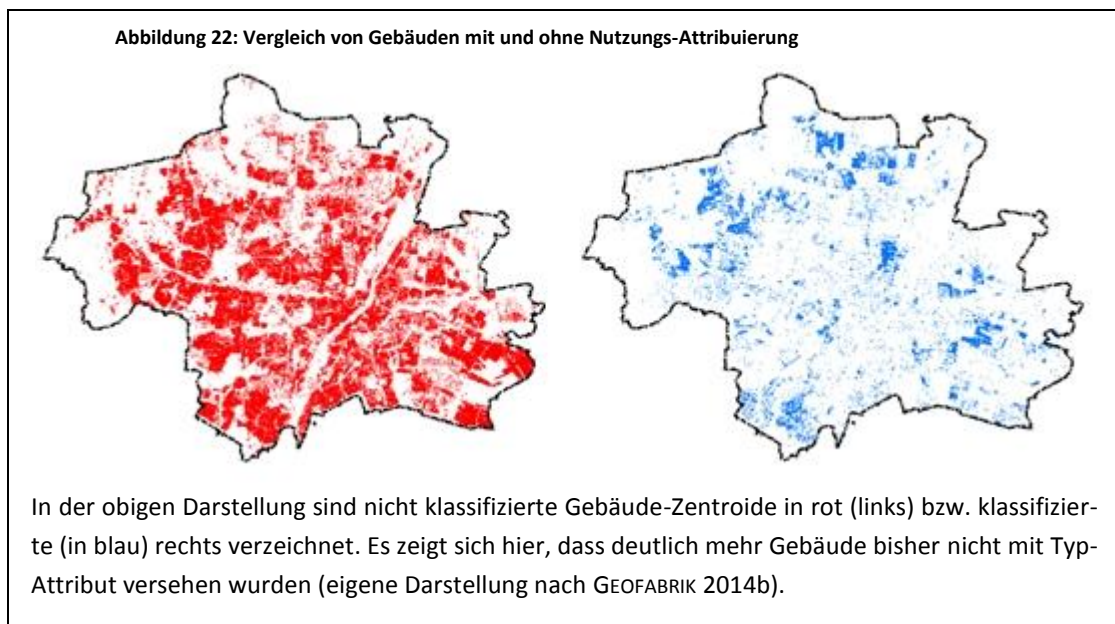
#### 8.5.4 OSM-POLYGONBESTÄNDE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET

Neben Punkt und Linien-Features soll hier noch kurz auf die Polygonbestände eingegangen werden. Der Gebäudebestand wird in den OpenStreetMap-Daten mit 152.719 angegeben. Zwar unterscheidet OSM zwischen Wohngebäuden und anderen Typen wie Industriebauten oder öffentlichen Gebäuden, allerdings sind zu viele, insgesamt 124.558, noch unklassifiziert, dies entspricht einem Anteil von 81,6 Prozent. Dies verhindert einen Vergleich mit der amtlichen Statistik, da nicht unterschieden werden kann, welchem Zweck das jeweilige Gebäude dient, und damit eine Ermittlung des Wohnbestandes unmöglich ist. Wären alle Gebäude im OSM-Datensatz klassifiziert, wäre es möglich die amtlichen Statistiken zu Wohngebäuden als Vergleichsmöglichkeit heranzuziehen. Für das Jahr 2011 geben die amtlichen Quellen die Zahl von 135.672 (STATISTISCHES AMT MÜNCHEN o.J.) bzw. 140.216 (JOEBGES 2014) an. Somit wäre ein Vergleich auch nur annäherungsweise möglich gewesen. Vergleicht man die reinen Zahlenbestände miteinander, ohne die Problematik der Typisierung zu beachten, so scheint in München bereits ein Großteil aller Gebäudestrukturen kartiert zu sein. Eine belastbare Aussage, ist dies aber nicht, da es nicht Aufgabe dieser Arbeit ist, die Vollständigkeit von OpenStreetMap-Daten zu prüfen. Es soll hier nur kurz erwähnt werden, dass die klassifizierten Gebäude in München nicht gehäuft in der Innenstadt auftreten, wie dies nach den Erkenntnissen von ZIELSTRA und ZIPF sowie HECHT, KUNZE

und HAHMANN erwartbar gewesen wäre. Sie zeigen, dass sich in den Innenstädten ihrer Untersuchungsgebiete die Datenbestände mit höherer Genauigkeit und Vollständigkeit befinden (ZIELSTRA & ZIPF 2010, HECHT et al. 2013). In München hingegen liegen die meisten der genauer typisierten Gebäude im Außenbereich und damit an den Rändern



der Bebauung.



#### 8.5.5 BEWERTUNG DER OPENSTREETMAP-DATEN

Die Analyse des OpenStreetMap-Datenbestands für München zeigt, dass die Daten mit Fehlern behaftet sind und daher nicht ohne Einschränkungen für Analysezwecke verwendet werden können. Während die Punktdaten, wie Haltestellen, vor allem bei den schienengebundenen Nahverkehrsmitteln eine hohe Qualität besitzen - alle sind vorhanden und räumlich akkurat verortet - bestehen bereits bei den Linien-Features zum Teil gravierende Fehler. Das Fehlen von Teilen von Strecken, wie beispielsweise der Tram 12 zwischen Landshuter Allee und Schwabing Nord, sind so gravierend, dass sie die Analyse des Netzwerks verfälschen. Der Polygonbestand, hier wurde auf Grund der fehlenden wissenschaftlichen Grundlage zu Landnutzungsdaten in OSM nur der Gebäudebestand betrachtet, zeigt, dass in München mehr Gebäude in OSM aufgeführt sind als in amtlichen Verzeichnissen. Allerdings ist die Klassifizierung nach Nutzungsform noch ausbaufähig. Nimmt man diese Einschränkungen auf so bleiben dennoch einige Möglichkeiten offen, Nahverkehrssysteme zu bewerten. Die verorteten Haltestellen erlauben die Berechnung von Einzugsbereichen und damit die Identifizierung von unerschlossenen Gebieten innerhalb der Landeshauptstadt München. Vergleicht man diese mit dem OSM-Gebäudebestand lässt sich auch klären, ob diese überhaupt erschlossen werden müssen, oder ob es sich um Gebiete außerhalb der Siedlungsfläche handelt. Einschränkend muss aber erwähnt werden, dass die Attraktivität des Angebots, also ob ein Gebiet von einem Bus im 60-Minuten-Takt oder eine U-Bahn im Fünf-Minuten-Takt angebunden wird, damit

nicht darstellbar ist. Für CURTIS und SCHEURER stellt das Taktangebot aber mit das wichtigste Entscheidungskriterium dar. Aus ihrer Sicht wird der ÖPNV nur genutzt, wenn er ein attraktives Angebot unterbreitet. Als kritische Grenze sehen sie ein geringeres als ein halbstündiges Angebot in der Zwischenverkehrszeit (10.00 bis 15.00Uhr) an (CURTIS & SCHEURER 2010, SCHEURER 2013). Diese Daten werden in der Google Transit Feed Specification gesammelt, stehen aber leider nicht zur Verfügung (GOOGLE 2014, GOOGLE o.J., REITER 2013).

## 9 ANALYSE EINES NAHVERKEHRSNETZWERKS: DAS BEISPIEL MÜNCHEN

Im vorherigen Absatz wurde auf die Problematik der Eingeschränktheit der freien Daten bereits ausführlich hingewiesen. Dennoch soll hier versucht werden, basierend auf den vorhandenen Daten, aussagekräftige Ergebnisse über das Münchner Nahverkehrssystem mit Hilfe eines GIS zu erzielen. Dabei werden sämtliche als verlässlich eingeschätzte Datenbestände einbezogen. Darüber hinaus werden frei verfügbare, aber nicht freie Datenbestände, wie der Streckenagent der S-Bahn-München AG und aggregierte Fahrplandaten, zum Einsatz kommen. Diese sollen auf ihre Fähigkeit hin betrachtet werden, Schwachstellen aufzudecken. Die Analyse orientiert sich dabei an den Indikatoren, die in den Methoden der graphentheoretischen Erklärungen und in den GIS-basierten Bewertungswerkzeugen vorgestellt wurden, sofern die vorhandenen Daten dies zulassen.

Da sich die folgende Analyse auf das Münchner Nahverkehrssystem stützt, wird hier kurz auf dieses eingegangen. Das System wird im Wesentlichen von zwei großen Verkehrsunternehmen befahren. Die S-Bahn München AG ist im Auftrag des bayerischen Verkehrsministeriums der Betreiber des regionalen Schienenverkehrs. Ihre Aufgabe ist es, die Region an die Landeshauptstadt München anzubinden (BAYERISCHE EISENBAHNGESELLSCHAFT 2014). Das Münchner S-Bahn-System zeichnet sich durch seine Westlastigkeit aus. Sieben Linien, in diesem Fall auch sieben Strecken, fahren in den Flaschenhals Stammstrecke von Westen aus ein. Die S1 endet am Ostbahnhof und die S6 verstärkt die Linie S4, so dass im Osten lediglich fünf Strecken in Richtung Innenstadt bestehen (MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2014b).

Die Münchner Verkehrs-Gesellschaft (MVG) wiederum ist für die Erschließung innerhalb der Stadt verantwortlich. Sie betreibt die U- und Trambahn, sowie die innerstädtischen Buslinien (MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2010, MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2014a, MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2014b). Eine Übersicht über das Schnellbahnnetz sowie die Trambahn und Express-Buslinien findet sich im Anhang (MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2014b).

## 9.1 ANALYSE MIT OPENSTREETMAP-DATEN

### 9.1.1 EINZUGSBEREICH UM HALTESTELLEN

Ein einfacher Indikator in der Nahverkehrsplanung ist der Einzugsbereich. Ohne auf die Angebotsqualität einzugehen, lässt sich das bediente Gebiet einer Stadt berechnen. BRUNOTTE (BRUNOTTE et al. 2002) sieht die Bereitstellung von Angebot bereits als einen Beitrag zur Erreichbarkeit, während NUHN und HESSE (NUHN & HESSE 2006) sowie KNOX und MARSTON (KNOX & MARSTON 2001) allein das Vorhandensein einer Fahrmöglichkeit in ihrer Definition von Erreichbarkeit nicht aufführen. In ihren Definitionen müssen zur Ermittlung der Erreichbarkeit qualitative Angaben zum Umfang des ÖPNV-Angebots gemacht werden. Sie finden sich damit in Übereinstimmung mit CURTIS und SCHEURER und deren SNAMUTS-Ansatz (CURTIS & SCHEURER 2010).

Trotz dieser Einschränkungen wird die Berechnung des Einzugsbereichs um Haltestellen als sinnvoll erachtet. Anhand des Indikators lassen sich relativ einfach Schwachstellen im System finden (SCHWARZE 2002, SCHWARZE 2003). Zur Ermittlung der Einzugsbereiche werden in der Literatur verschiedene Abstände zu den Zugangspunkten des ÖPNV genannt. Diese unterscheiden sich dabei nicht nur zwischen urbanen und ländlichen Gebieten, sondern auch in urbanen Zonen wird nach der Nutzungsintensität differenziert. Das bayerische Wirtschaftsministerium sieht für Ober- und Mittelzentren drei verschiedene Bereiche vor. In der Kernzone sollte das Netz am dichtesten sein, daher sind die Einzugsbereiche für die Schnellbahnen (U- und S-Bahn) auf 600m und die der Tram und Busse auf 300m festgelegt worden (Richtwerte). Diese betragen in Gebieten mit hoher Nutzungsdichte bei den Schnellbahnen ebenso 600m, bei Tram und Bus aber bereits 400m. In Gebieten mit niedriger Nutzungsdichte steigt der Einzugsbereich bei U- und S-Bahn auf 1000m und bei Straßenbahnen und Bus auf 600m (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE o.J.). In der vorliegenden Analyse wurden generell die Werte für Gebiete mit hoher Nutzungsdichte angesetzt. Die im Vergleich zu Mittelzentren Bayerns hohe Bevölkerungszahl Münchens und die herausgehobene Stellung als Landeshauptstadt rechtfertigen dies. Alle im Landesentwicklungsprogramm Bayern aufgeführten Ober- und vor allem Mittelzentren sind deutlich kleiner als München (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND MEDIEN, ENERGIE UND TECHNOLOGIE 2013). Um zu einer Einschätzung der Erschließungsqualität zu gelangen, muss neben den Einzugsbereichen der Haltestellen, der Bestand an Gebäuden ohne Anbindung berechnet werden. Der aus OSM übernommene Gebäudebestand liegt in Polygonen vor. Diese werden zu Punkten (Gebäudezentroide)

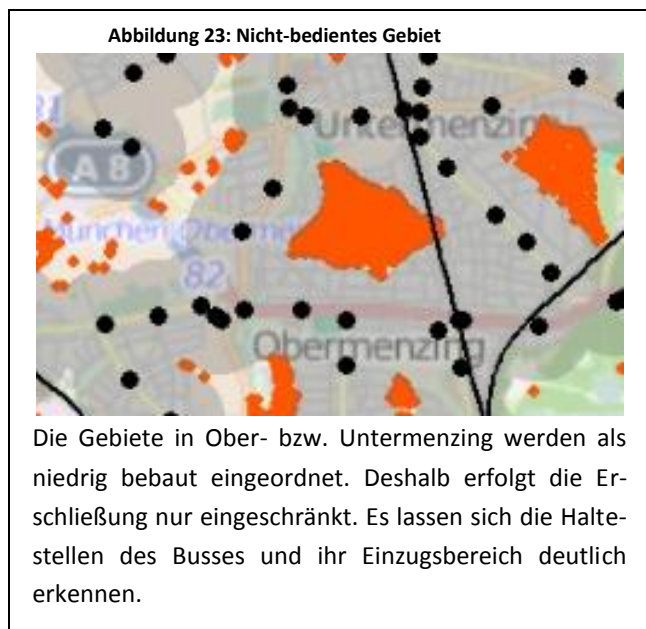
transformiert und anschließend die nicht bedienten Gebäude identifiziert. Es zeigt sich, dass in München ein Großteil innerhalb des Einzugsbereichs des ÖPNV befindet. Von den 152.719 in OSM verzeichneten Gebäuden lagen lediglich 11.644 außerhalb des erschlossenen Gebietes.

Die kartographische Darstellung (weiter unten) zeigt sehr genau, wo sich die Flächen mit den nicht-bedienten Gebäuden der Stadt München liegen. Diese befinden sich zumeist tendenziell eher im Münchner Westen, im Stadtrandgebiet bzw. außerhalb der geschlossenen Bebauung an den Autobahnen. Teilweise kann auch davon ausgegangen werden, dass Flächen die an Nachbargemeinden angrenzen (z.B. an Germering im Westen) von dortigen Haltestellen erschlossen werden, die sich aber außerhalb des Untersuchungsgebietes befinden und daher nicht berücksichtigt wurden. Weitere Aussagen über andere Gebiete gestalten sich schwierig. Wäre der

Gebäudebestand in OSM genauer klassifiziert, könnte bei anderen Gebieten abgeschätzt werden, ob auf Grund einer lockeren, niedrigeren Bebauung das Fahrgastpotential nicht ausreicht, um eine Erschließung zu rechtfertigen. Das Beispiel des Stadtgebietes im Bereich Ober- und Untermenzing wird hier beispielhaft erwähnt. Hier ist die Bebauungsdichte niedrig (AYDEMIR-

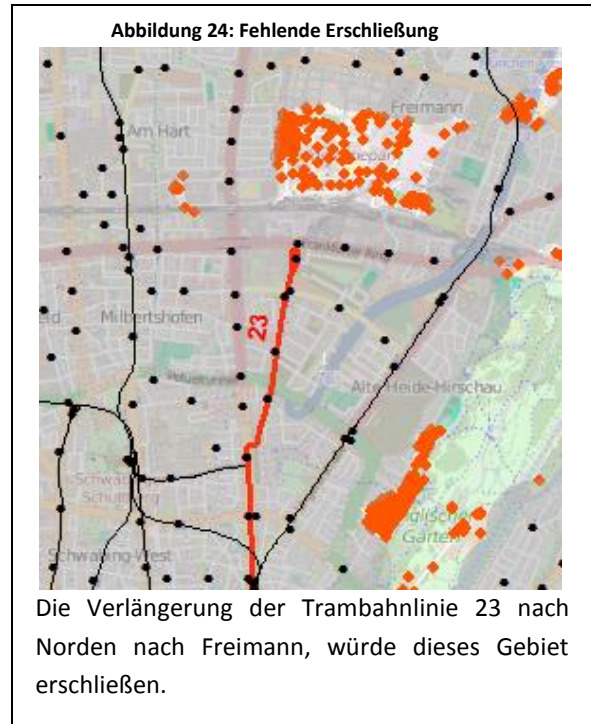
KENGEROGLU o.J.) und daher wird sich hier ein Angebot (z.B. Quartiersbus) für das Verkehrsunternehmen wirtschaftlich nicht betreiben lassen. Um zu diesem Ergebnis zu kommen, bedarf es aber auf Grund der fehlenden Attributzuweisung in OpenStreetMap des Wissens des Anwenders über das Untersuchungsgebiet.

Trotz aller Einschränkungen liefert diese auf Haltestelleneinzugsbereichen und Gebäudezentroide basierende Analyse aussagekräftige Ergebnisse. Es ist beispielsweise leicht entnehmbar, wo durch Verlängerung einer einzelnen Linie um eine kurze Strecke erhebliche Verbesserungen im Abdeckungsgrad erreicht werden können. So würde eine Verlängerung der Trambahnlinie 23 (Münchner Freiheit – Schwabing Nord) das Gebiet nördlich der Endhaltestelle erschließen und dazu beitragen mehr Gebäude direkt an das Schienennetz des Münchner ÖPNV-Netzes anzubinden. Der Vorteil dieser Analyse liegt in ihrer Einfach-



heit begründet. Es werden nur auch für den Laien verständliche Ausgangsdaten verwendet und auf aufwendige Werkzeuge und Algorithmen verzichtet.

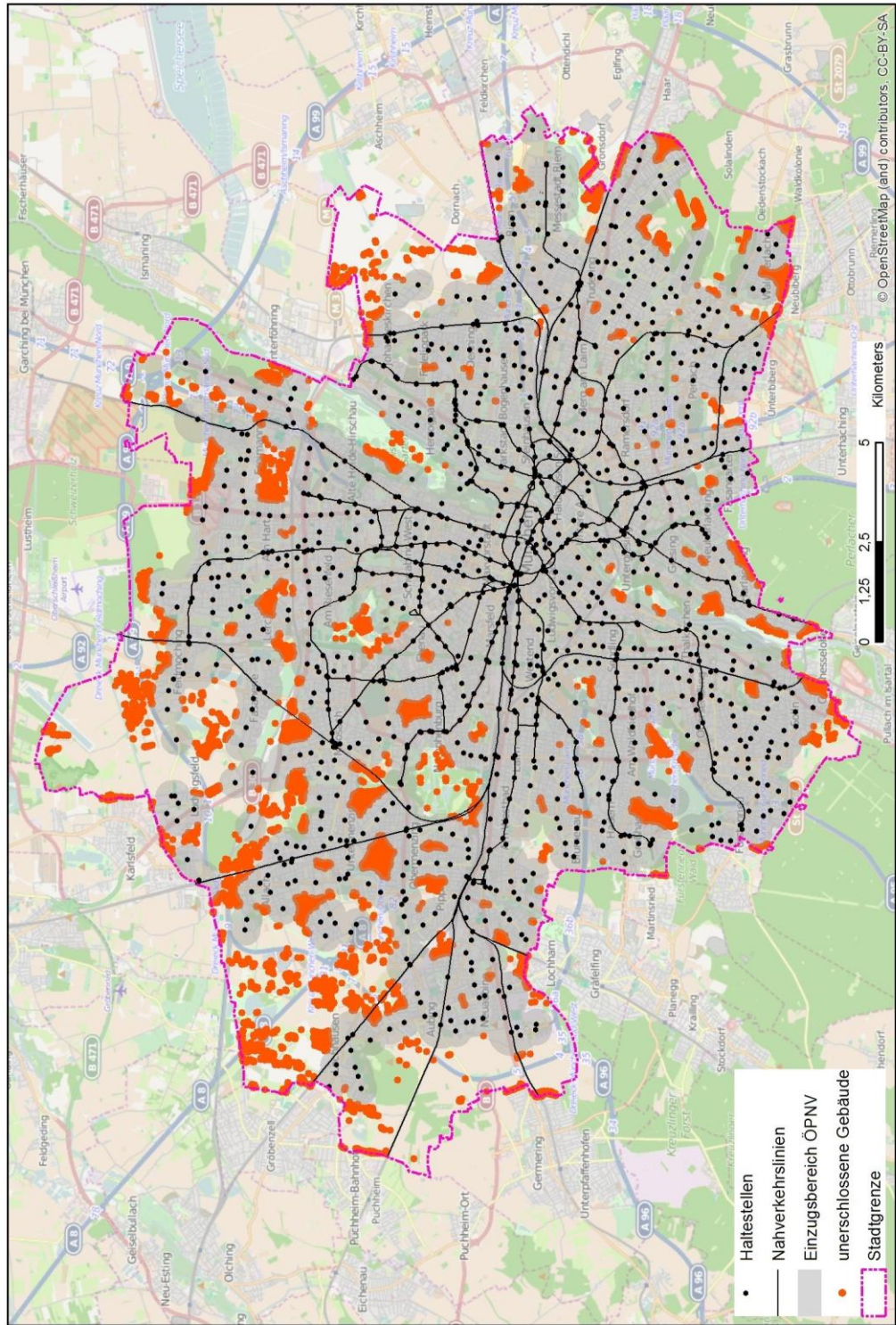
Einschränkend muss zuletzt aber noch erwähnt werden, dass ein Rest an Ungenauigkeit bleibt. Die fehlenden bzw. nicht räumlich zuordnungsbaaren Bus-Haltestellen (fast fünf Prozent) aus dem OSM-Bestand können das Bild verzerren. Die Verwendung der Haltestellendaten aus OSM liefert in München also nur bei S- und U-Bahnen sowie der Tram verlässliche Angaben über den Einzugsbereich.





Karte 1: Einzugsbereiche des ÖPNV und nicht-bediente Gebäude

Gebäude außerhalb des Einzugsbereichs der Haltestellen des öffentlichen Nahverkehrs der Stadt München



### 9.1.2 INDIKATOR STATIONSABSTAND

MUSO und VUCHIC sehen in den Abständen zwischen Stationen einen belastbaren Indikator für die Ausrichtung von Nahverkehrssystemen. Die Ausrichtung lässt sich damit erkennen, da größere Abstände ein schnelleres Erreichen der Ziele erlaubt, allerdings die Erschließung der Fläche abnimmt (MUSO & VUCHIC 1988, MUSO & VUCHIC 1988, VUCHIC 2005, DERRIBLE & KENNEDY 2011). Im Fall der Stadt München kann erwartet werden, dass die Abstände je nach Verkehrsmittel und der Reichweite differiert. Die Trambahn als Mittel zur Feinerschließung weist durchschnittlich die kürzesten Wegstrecken auf. Sie verzeichnet auch die meisten Haltestellen. Die U-Bahn hingegen hat bereits deutlich weniger Haltestel-

**Tabelle 1: Netzlänge, Stationen und Stationsabstände**

	Netzlänge in m	Stationen	Durchschnittlicher Stationsabstand in m
Trambahn	83775	160	452
U-Bahn	87937	93	907
S-Bahn	76539	42	1822

Die Ermittlung der Stationsabstände zeigt auch gleichzeitig die Bedeutung der Komplexität von Verkehrssystemen. Lediglich bei der S-Bahn besteht ein 1:1 Verhältnis von Kanten und Knoten. Bei U-Bahn und Tram gibt es mehr Kanten als Knoten, daher haben diese Werte von 1,04 bzw. 1,15 (siehe die Indikatoren von MARBLE und GARRISON). Daher entspricht nur bei der S-Bahn die Division der Netzlänge durch die Stationen dem Durchschnitt der Stationsabstände.

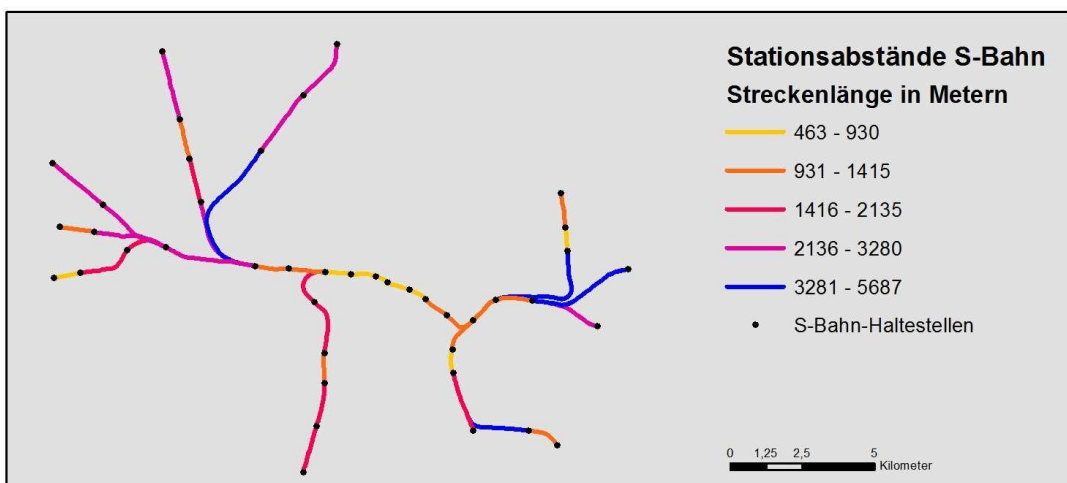
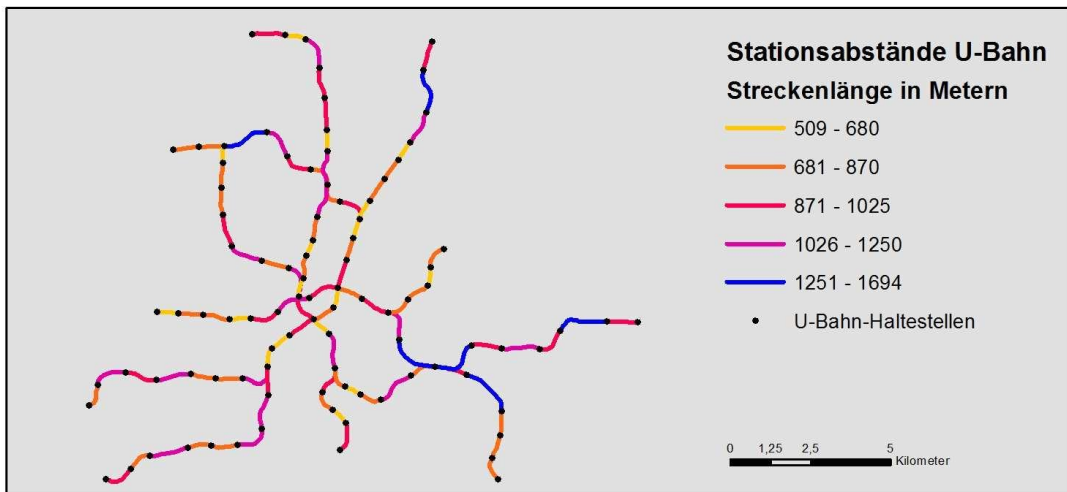
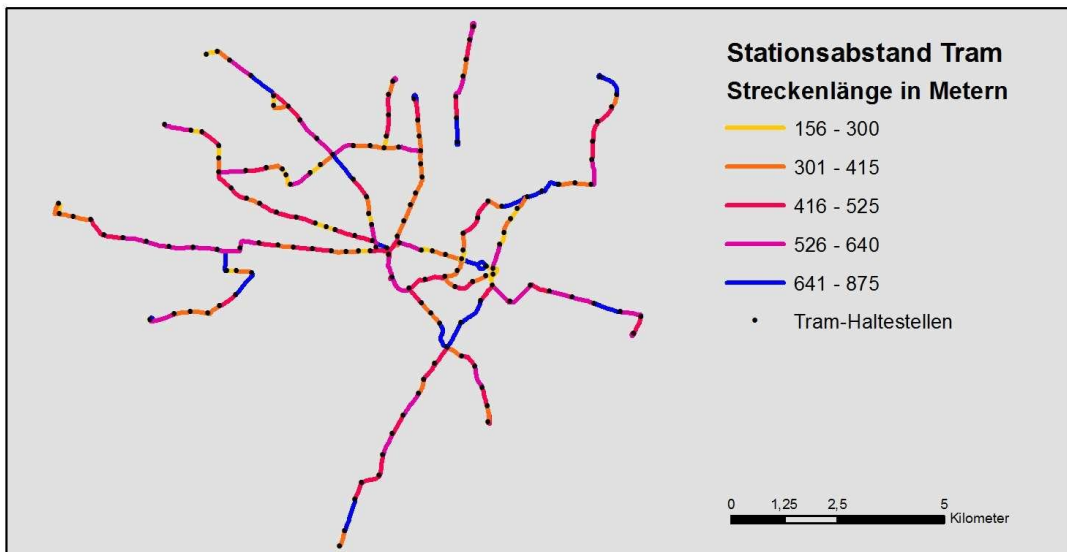
len und längere Abstände zwischen diesen. Die S-Bahn als Verkehrsmittel zur Erschließung der Region wiederum weist die geringsten Stationen im Untersuchungsgebiet und die größte Stationsabstände auf.

Es bestehen aber Unterschiede zwischen den städtischen Verkehrsmitteln U-Bahn und Tram und dem Aufgabenbereich des

Freistaats Bayern zugeordneten S-Bahn. Während erstere keinerlei Regelmäßigkeit bei der Abfolge der Länge der Stationsabstände erkennen lassen, außer dass die längsten Abschnitte in den Außenbereichen zu liegen kommen, sticht die enge Haltestellenabfolge in der Innenstadt bei der S-Bahn deutlich hervor. Fünf der sieben kürzesten Stationsabstände finden sich im Bereich zwischen Donnersbergerbrücke und Isartor, also den Stationen der Münchner Innenstadt. Dabei ist der S-Bahn-Abschnitt zwischen Karlsplatz und Hauptbahnhof sogar noch kürzer als der kürzeste U-Bahn-Abschnitt. Die U-Bahn scheint in der Innenstadt die lokale Erschließung mit zu übernehmen. Dies geschieht dann allerdings auf Kosten der Fahrzeit in die Region.

Karte 2: Stationsabstände der Münchner Verkehrsmittel

Vergleich der Stationsabstände zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln



### 9.1.3 FAZIT

Mit den aus OpenStreetMap stammenden Daten sind nur einfache Erreichbarkeitsindikatoren berechenbar. Zwar ist die Qualität der Daten ausreichend hoch, sie kann aber an die von Verkehrsunternehmen privaten Unternehmen angebotenen Daten nicht heranreichen. Im Bereich der schienengebundenen Verkehrsmittel hat die Analyse gezeigt, dass sämtliche Haltestellen bereits verzeichnet sind. Die Erschließungsqualität lässt sich hier gut berechnen, diese Möglichkeit besteht beim Bus nur bedingt. Auch fehlen die nötigen Angaben, um die komplexeren Indikatoren wie SNAPTA oder SNAMUTS anzuwenden. Die frühen Indikatoren, wie z.B. von MUSSO und VUCHIC hingegen können selbst ohne größere GIS-Kenntnis einfach operationalisiert und angewendet werden. Hierzu bedürfte es aber nicht des vollen Umfangs an Einsatzmöglichkeiten von GIS.

## 9.2 ANALYSE MIT FREI VERFÜGBAREN DATEN

### 9.2.1 ERMITTLUNG DER BEDEUTUNG VON STATIONEN MIT FAHRPLANDATEN

Die Ermittlung der Bedeutung von Haltestellen in einem Verkehrsnetzwerk anhand von kumulierten Abfahrten in einem gewissen Zeitfenster wird in einigen Studien durchgeführt. Im SNAMUTS Indikator „ **betweenness centrality**“ (auch **global betweenness** genannt, Zentralität der Zwischenlage) kommt dieses Konzept zum Tragen. SCHEURER schreibt dazu: „Der Zwischenlage-Index quantifiziert die Präsenz von ÖV-Reisegelegenheiten“ (SCHEURER 2013). Diese ÖV-Reisegelegenheiten sind nichts anderes als die Abfahrten von Verkehrsmitteln an einer beliebigen Haltestelle zu allen anderen Nachbarknoten. SNAMUTS geht davon aus, dass dieser Indikator durch Betrachten der Abfahrten in der Lage ist, Kanten und Knoten eines Netzes zu identifizieren, die besonders anfällig sind (CURTIS & SCHEURER 2010, SCHEURER 2013). Diese lokale Betrachtung auf der Ebene der einzelnen Knoten im System wird im SNAMUTS-Modell in den Indikator **nodal betweenness** (lokale Zwischenlage) integriert (SCHEURER 2013). Dieser Indikator ist qualitativ und SCHEURER warnt, dass hohe Werte nicht gleichbedeutend mit einer hohen Erreichbarkeit sind, sondern diese können auf Stresssymptome hinweisen. Insbesondere dann wenn wenigen Knoten mit hohen Werten, eine hohe Zahl Knoten mit niedrigen Werten gegenüberstehen. Allerdings werden in SNAMUTS neben den Reisegelegenheiten auch die Attraktivität der Ziele und ihre Eignung als Aktivitätszentren mit betrachtet. Die Indikatoren sind also weit mehr als reine Bewer-

tungen der Angebotsqualität an einer Haltestelle. Da die Landnutzung in OpenStreetMap (noch) nicht ausreichend genau dokumentiert wird, muss in der vorliegenden Auswertung auf diese verzichtet werden. Lediglich die Abfahrten an der Station in der Hauptverkehrszeit zwischen acht und neun Uhr am Morgen eines Werktags werden betrachtet. Dazu wurden die amtlichen Fahrplandaten für jede Station ausgewertet.

Die Analyse zeigt, dass die von SCHEURER (SCHEURER 2013) beschriebene Überlastung in München möglicherweise auftritt. Zehn Knoten mit auffallend hohen Werten (hell- und dunkelblaue Stationen in der folgenden Karte) stehen 246 Knoten mit deutlich geringeren Abfahrten pro Stunde gegenüber. Die Überlastung einzelner Stationen hat sich bereits gezeigt und Reaktionen hervorgerufen. Die Station Marienplatz wurde in den Jahren zwischen 2003 und 2006 mit einem zusätzlichen Fahrgasttunnel zum besseren Abfluss und Trennung der zusteigenden und aussteigenden Personen, ausgestattet (MÜLLER & ORTH 2005). Die Station Sendlinger Tor wird ab dem Jahr 2015 umgestaltet, da sie der Menge an Fahrgästen baulich nicht mehr gewachsen ist (MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT o.J.b).

Darüber hinaus zeigt die Darstellung der Ergebnisse der Analyse mit Fahrplandaten auch die räumliche Verteilung der zehn Knoten im Stadtgebiet Münchens. Sie häufen sich in zentraler Lage. Je weiter man sich vom Stadtzentrum entfernt, desto seltener werden Haltestellen mit hohem Abfahrtsniveau. Daraus lässt sich schließen, dass Verbindungen nur noch in wenige Richtungen (und zu wenigen Knoten) angeboten werden. Dies weist darauf hin, dass das Münchner Nahverkehrssystem sehr aufs Zentrum ausgerichtet ist. Die daraus resultierende radiale Struktur wird nicht durch Tangenten aufgebrochen, die die zentralen Umsteigeknoten entlasten könnten. Auch SNAMUTS kommt bei der Analyse des Münchner ÖPNV-Netzwerks zu diesem Ergebnis. So schreibt SCHEURER:

*Die Struktur des Netzes erscheint jedoch radialer und zentralisierter als in Wien, Hamburg oder Kopenhagen und legt nahe, dass diese Effekte<sup>24</sup> hier in ausgeprägterer Form auftreten (SCHEURER 2013).*

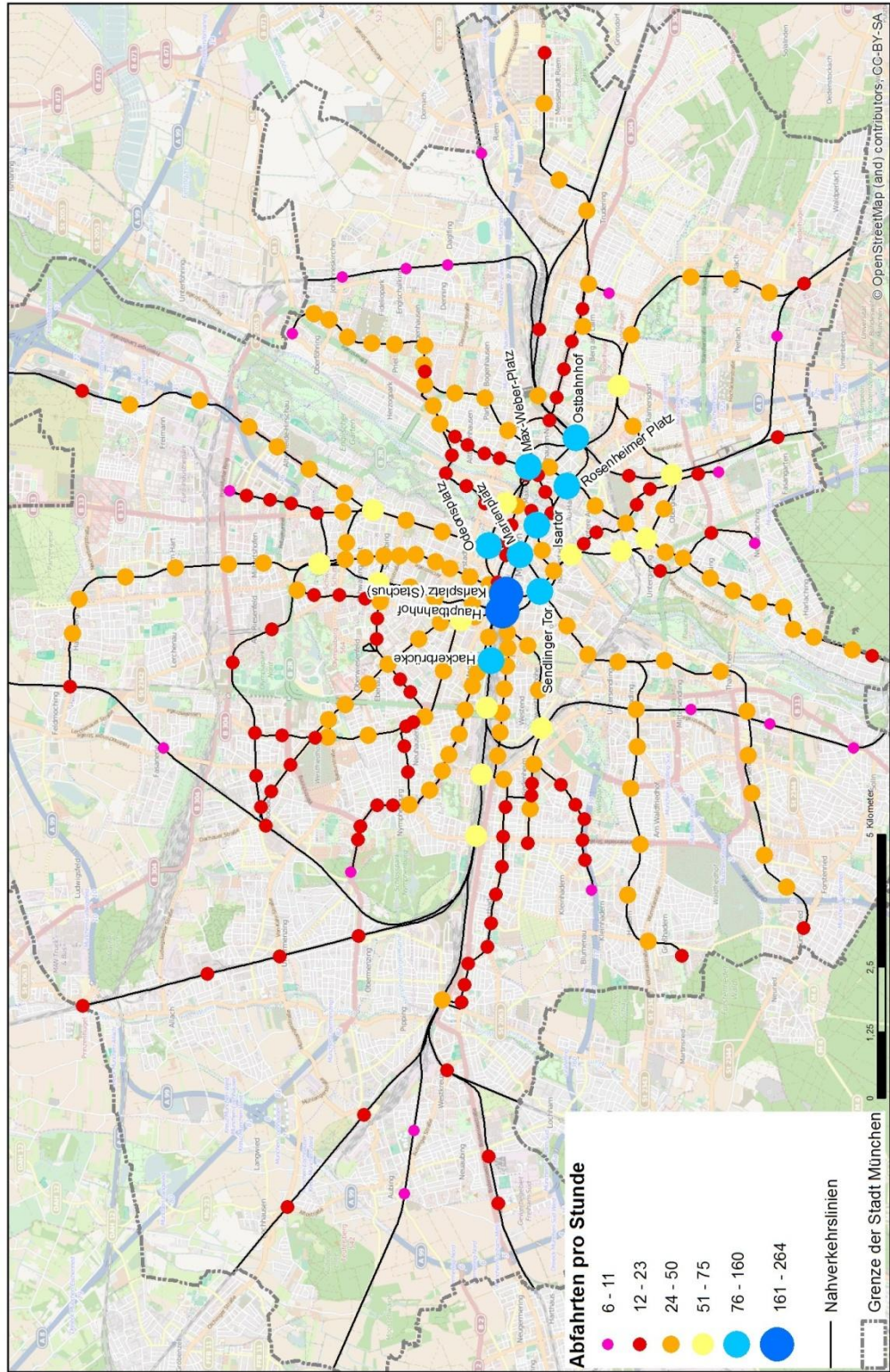
---

<sup>24</sup> Anmerkung: SCHEURER spricht hier von den negativen Effekten der Indikatoren global betweenness und nodal betweenness (SCHEURER 2013).

Karte 3: Zentralität der Münchner Haltestellen

### Zentralität der Haltestellen des Münchner Nahverkehrs

Abfahrten in der Hauptverkehrszeit (Früh) in jede Richtung



### 9.2.2 STÖRUNGSMELDUNGEN ALS ANZEIGER FÜR VERLÄSSLICHKEIT

Neben der Attraktivität des Taktangebots spielt für den Fahrgast die Verlässlichkeit des ÖPNV eine wichtige Rolle (BEIRÃO & SANSFIELD CABRAL 2007, RIETVELD et al. 2001). Die S-Bahn München AG hat darauf reagiert und bietet ihren Kunden die Möglichkeit, einen strecken-genauen Störmelder per E-Mail zu abonnieren (S-BAHN MÜNCHEN o.J.). Dieser meldet neben akuten Vorfällen auch geplante Beeinträchtigungen wie beispielsweise Baustellen. In einer Störmeldung werden der jeweilige Störungsgrund, die voraussichtliche Dauer und die Auswirkungen näher benannt. Die Informationsübermittlung in Echtzeit versetzt den Fahrgast in die Lage, angemessen auf die Störung zu reagieren und sich notfalls alternative Verkehrsmittel zu suchen.

Die in der Störmeldung gemachten Angaben lassen sich auswerten und zeigen, welche Strecke besonders häufig direkt von Störungen betroffen ist, und auf welcher lediglich die Auswirkungen zu spüren sind. Für die vorliegende Arbeit wurden die Meldungen aus dem Zeitraum zwischen 01. Januar 2014 und 10. Dezember 2014 ausgewertet. Insgesamt wurden 1316 Störungen verzeichnet. Es wurde dabei jedoch jeder Vorfall nur mit der jeweils größten Einschränkung verzeichnet. Wurden zu einem Vorfall beispielsweise zuerst Verspätungen von bis zu 15 Minuten gemeldet und später der Ausfall von Zügen, so wurde der Zugausfall diesem Vorfall zugeordnet<sup>25</sup>. Dies geschieht um einzelne Vorfälle nicht doppelt zu zählen und somit die Vergleichbarkeit zwischen Strecken nicht zu beeinträchtigen. Eine Einschränkung in der Statistik ist die mangelnde Gültigkeit der Aussagen für die Stammstrecke. Züge, die auf den Strecken in Richtung Westen ausfallen (in der folgenden Abbildung an dem Zusatz West zu erkennen), haben normalerweise den Laufweg vom Ostbahnhof durch die Stammstrecke zu ihrem Endpunkt. Bei Störungen kann es vorkommen, dass diese nicht in der Stammstrecke verkehren, allerdings wird dafür keine gesonderte Meldung herausgegeben, da auf der Stammstrecke ein ausreichend dichter Takt herrscht. Die Auswertung aber fußt auf den Angaben der jeweiligen Mitteilung und den genannten Auswirkungen. Es erfolgte keine Überarbeitung und Übertragung möglicher Auswirkungen von Zugausfällen auf den Außenästen der S-Bahn München auf die Stammstrecke, da dieser nicht mit einer Meldung belegt wird. Folglich wird auf eine kartographische Darstellung der Ergebnisse der Analyse der inhaltlichen Auswertung des Störmelders für die Stammstrecke verzichtet. In der folgenden Abbildung sind also nur die Störungen

---

<sup>25</sup> Die zu Grunde liegende Annahme ist, dass der Ausfall eines Zuges schwerer wiegt, da die Wartezeit bis zum nächsten gezählt werden muss, sich die Wartezeit also um die Taktzeit erhöht.

für die Stammstrecke verzeichnet, die in der Störmeldung eindeutig Bezug zur Stammstrecke nehmen.

Ein erster Blick auf die Statistik zeigt, dass lediglich die betriebsbedingten Einschränkungen sehr deutliche Unterschiede zwischen den Strecken aufweisen<sup>26</sup>. Die Erklärung hierfür ist

**Tabelle 2: Gründe der Störungen**

	Grund für die Störungsmeldung							
	Störungen gesamt	Betriebliche Einschränkungen	Polizei-/Rettungseinsatz	Personen im Gleis	Sonstiges	Stellwerksausfall	Technik Strecke	Technik Triebfahrzeug
Gesamtnetz	1316	188	311	139	87	85	428	78
Stammstrecke	145	1	69	15	6	5	34	15
Freising S1	140	2	28	15	28	7	52	8
S2 West Dachau	158	68	19	11	4	9	37	10
S2 Ost Erding	78	1	21	8	1	8	33	6
S3 West Mammendorf	121	21	27	14	12	5	33	9
S3 Ost Deisenhofen	99	20	21	9	10	5	29	5
S4 West Geltendorf	64	0	15	11	1	7	27	3
S4 Ost Ebersberg	72	0	20	14	3	9	22	4
S6 West Tutzing	75	3	21	13	5	5	24	4
S7 West Wolfratshausen	56	0	18	6	2	3	23	4
S7 Ost Kreuzstraße	78	1	14	9	3	7	41	3
S8 West Herrsching	174	71	21	9	6	12	49	6
S8 Ost Flughafen	56	0	17	5	6	3	24	1

Aufstellung der Gründe für Störungsmeldungen je Linienabschnitt (eigene Auswertung, S-BAHN MÜNCHEN o.J.)

relativ einfach. Es handelt sich um den Ausfall der Züge, die auf den Strecken nach Dachau, Mammendorf, Deisenhofen und Herrsching den 10-Minuten-Takt herstellen. Diese Strecken sind mit eigenen Gleisen für die S-Bahn ausgerüstet und haben daher die Kapazität

für weitere S-Bahnen. Die anderen Strecken der S-Bahn München sind entweder eingleisig oder werden im Mischbetrieb mit Fern-, Regional- und Güterverkehr betrieben und erlauben daher nur Fahrten im 20-Minuten-Takt<sup>27</sup>. Die Züge des Zehn-Minuten-Takts können folglich auch nur auf diesen Strecken ausfallen. Zumeist liegen die Gründe hierfür auf anderen Strecken und deren infrastrukturellen Nachteilen, wie Eingleisigkeit und Mischbetrieb. Der Ausfall dieser Taktverstärker dient dazu, das Gesamtsystem nach Störungen schneller wieder ins Gleichgewicht zu bringen (VÖLKLEIN 2015).

Die nachfolgende Karte befasst sich mit diesem Phänomen. Etwas überraschend wird als erstes festgestellt, dass eine hohe Zahl an Störmeldungen nicht mit einer vermuteten mangelnden, nicht dem Bedarf angepasster Infrastrukturausstattung einhergeht. Strecken wie die

<sup>26</sup> Die hohe Zahl an sonstigen Gründen für die Störung auf der S1 hängt mit einem Unfall aus dem August 2014 zusammen. Ein Lkw-Fahrer hatte ein Brücke so schwer beschädigt, dass die Statik beeinträchtigt wurde und es in der Folge immer wieder zu Einschränkungen kam (BACKES 2014).

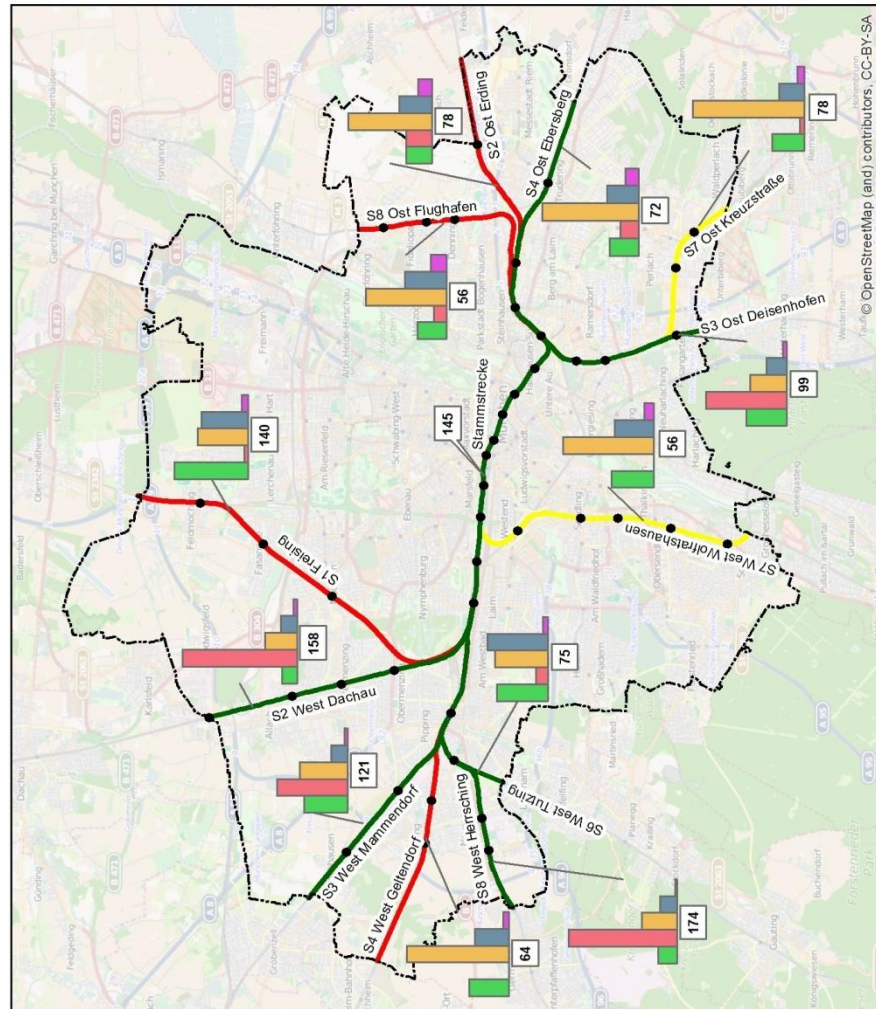
<sup>27</sup> Zur Problematik der verschiedenen Geschwindigkeiten verschiedener Zuggattungen und der Auswirkung der Geschwindigkeitsschere auf die Streckenkapazität siehe HARROD (HARROD 2009).



S2 West nach Dachau oder die S8 West nach Herrsching besitzen entweder zwei eigene Gleise für reinen S-Bahn-Betrieb oder die beiden zur Verfügung stehenden Gleise werden nur von der S-Bahn befahren und bieten dem Fahrgast den Komfort eines Zehn-Minuten-Takts. Der schon erwähnte häufige Ausfall dieses Zehn-Minuten-Takts (Ausfall der sogenannten Taktverstärker) erklärt daher auch die hohe Zahl von Störmeldungen, da für jeden Ausfall (morgens und abends) eine Information an den Fahrgast erfolgt.

Karte 4: Infrastruktur und Störmeldungen

Infrastruktur und Betrieb bei der S-Bahn München sowie Verteilung der Störungen je Linienabschnitt



**Infrastruktur der Schienenwege**  
 Mischbetrieb mit Fern-, Regional- und Güterzügen  
 kein Mischbetrieb, eigene S-Bahn-Gleise  
 kein Mischbetrieb, eingleisig  
 Mischbetrieb, zweigleisig  
 Haltestelle der S-Bahn

**Art des Ausfalls**  
 Anteil an Störungen Linienabschnitt  
 Streckensperrung  
 Zugausfall  
 Verspätungen  
 Haltestellenausfall  
 unspezifiziert

78 Anzahl der Störmeldungen  
 Grenze der Stadt München

Auswertung der Störmeldungen der S-Bahn München AG zwischen 01. Januar 2014 und 10. Dezember 2014.  
 Keine Darstellung der Ergebnisse für die Stammstrecke aufgrund mangelnder Datengrundlage. (eigene Darstellung, Februar 2015)

0 1,25 2,5 5 Kilometer

Sehr interessant aus Fahrgastsicht ist die hohe Zahl von Störmeldungen auf der S1, ohne dass es dort zu Zugausfällen kommt. Das Niveau ist ähnlich hoch wie in der Stammstrecke, wobei hier deutlich mehr Linien verkehren. Die Karte zeigt zudem, dass der Anteil der Zugausfälle auf den Strecken der S2 nach Dachau, der S3 nach Mammendorf, der S8 nach Herrsching und der S3 nach Deisenhofen besonders hoch ausfällt. Dies korreliert mit den Linien des 10-Minuten-Takts. Lediglich auf der S4 im Osten nach Ebersberg ist dieses Phänomen nicht zu erkennen. Dafür ist auf dieser Linie zu beobachten, dass Verspätungen deutlich häufiger auftreten als bei allen anderen Linien, die nicht im Mischbetrieb mit Fern-, Regional- oder Güterverkehr betrieben werden. Generell zeigt sich bei Verspätungen das Bild, dass die geringere Infrastrukturausstattung einem höheren Anteil an Verspätungen auf den Linien führt. Es spielt dabei keine Rolle, ob die Strecke eingleisig ohne Mischbetrieb oder zweigleisig mit Mischbetrieb ist. Dies erklärt sich aus dem Eisenbahnbetrieb. Eingleisige Streckenabschnitte können nur jeweils in eine Richtung befahren werden und auf zweigleisigen Mischbetriebsstrecken ist auf andere Züge Rücksicht zu nehmen. Auf eigenen Gleisen hingegen kann die S-Bahn Verspätungen möglicherweise aufholen. Die Auswertung der Streckenmeldungen zeigt also, dass die Infrastruktur bei Störfällen eine Rolle spielt und ein Ausbau, z.B. zweigleisige Abschnitte, dabei helfen können, Verspätungen abzubauen und den Betrieb zu stabilisieren (BURDETT & KOZAN 2006, ABRIL et al. 2008, HARROD 2009).

Die nachfolgende Karte greift die Problematik auf, dass Strecken mit besserer Infrastrukturausstattung und größerer Kapazität öfter von Meldungen betroffen sind. Sie verortet die Zahl der Störmeldungen je Linienabschnitt und die jeweilige Verteilung des Ausgangsortes der Störung<sup>28</sup>. Es zeigt sich, dass die Störungsübertragungen auf die Strecken des Zehn-Minuten-Takts am häufigsten vorkommt (die letzten drei Werte in der nebenstehenden Grafik beziehen sich auf die Abschnitte im Streckennetz, an denen sich Linien überlagern und somit Störungen für zwei

**Abbildung 25: GIS-basierte Auswertung der Störungs-**  
**Auswirkungen**

Table

Benachrichtigungen über Störungen

	Strecke	Störung Auswirkung
	S7 West Wolfratshausen	25
	S7 Ost Kreuzstraße	25
	S8 Ost Flughafen	28
	S4 West Geltendorf	28
	S4 Ost Ebersberg	36
	S2 Ost Erding	37
	S6 West Tutzing	42
	S1 Freising	48
	S3 Ost Deisenhofen	49
	S8 West Herrsching	52
	S3 West Mammendorf	53
	S2 West Dachau	54
	S2 Ost und S4 Ost	73
	S3 Ost und S7 Ost	74
	S6 West und S8 West	94

Anzahl der Störungsauswirkungen auf einzelnen Abschnitten

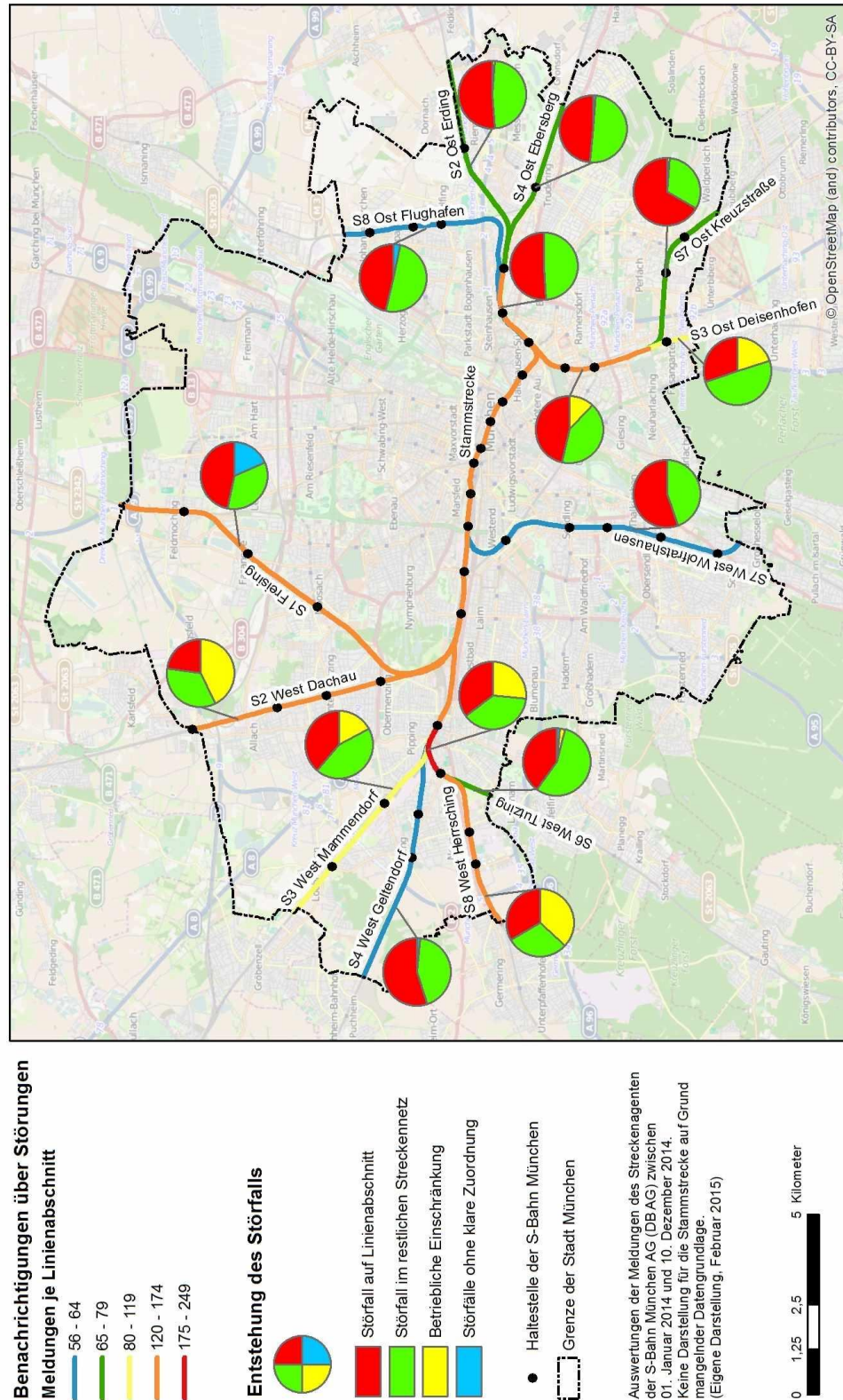
<sup>28</sup> Eine Aufstellung der Auswirkungen der Störfälle befindet sich im Annex.

Linien zum Tragen kommen). Dabei bewegt sich die Anzahl für alle Übertragungen der Außenäste der S-Bahn München zwischen 25 und 54 und damit sind keine massiven Unterschiede festzustellen. Auffällig dagegen ist, der hohe Anteil von Störungen, die auf den Linien im Mischbetrieb oder eingleisigen Strecken direkt ihre Ursache haben. Die absoluten Spitzenwerte werden auf der eingleisigen S7 erreicht. Störungen, die auf der Linie selbst entstehen, haben auf dem Westast einen Anteil von 55,4 Prozent und auf dem Ostast sogar von 66,7 Prozent. Vor allem beim Ostast spielt hier die technische Ausstattung eine große Rolle. Mehr als die Hälfte, nämlich 41 der 78 Störmeldungen, gaben die Streckentechnik als Grund für die Störung an.

Karte 5: Auswertung der Störungsmeldungen der S-Bahn München

## Auswertung der Störungsmeldungen "Streckenagent" der S-Bahn München

Darstellung der Gesamtmeldungen zu den jeweiligen Linienabschnitten und der Entstehung und Auswirkung auf die Außenäste der S-Bahn



### 9.2.3 BEWERTUNG DER ANALYSE MIT FREI VERFÜGBAREN DATENQUELLEN

Die frei verfügbaren Datenbestände, die aus den Fahrplanmedien des Münchner Verkehrsverbunds (MVV) und den Störungsmeldungen der S-Bahn München extrahiert wurden, liefern deutlich weitreichendere Einblicke als die Analyse mit OSM-Daten. Die Kumulierung von Abfahrten während der Hauptverkehrszeit zeigt an, welche Knoten im Münchner Nahverkehrsnetz besonders hochfrequentiert und damit besonderem Stress ausgesetzt sind. Die Ergebnisse dieser Analyse decken sich mit jenen der SNAMUTS-Analyse des Münchner Nahverkehrsnetzes. Die Nutzung der Fahrplandaten erlaubt also Einschätzungen zur Qualität des Systems, die weit über die einfachen Erreichbarkeitsindikatoren, wie z.B. Stationsabstand, hinausgehen. Dies liegt aber nicht daran, dass es sich um proprietäre Daten handelt, sondern daran, dass diese Daten von der Münchner Verkehrs-Gesellschaft nicht zur Verfügung gestellt werden. Im GTFS-Format bereitgestellte Daten können für diese Analyse ohne Probleme verwendet werden.

Ebenfalls wertvolle Einblicke gewähren die Störmeldedaten der S-Bahn München. Allerdings ist der zeitliche Vorlauf enorm, um belastbare Auswertungen zu treffen. Die Störungsmeldungen müssen zuerst gesammelt werden und danach in eine Datenbank ein gepflegt werden. Zudem kann keine automatisierte Übernahme in diese Datenbank erfolgen, da sich die Meldungen nicht an einem vorgegebenen Aussehen orientieren. Sie unterscheiden sich stark in ihrem Aufbau. Es gibt keine klare, in jeder Störmeldung einheitliche Klassifizierung der Gründe, der Auswirkungen und der Abhängigkeiten von Störungen. Sie sind teilweise mit Fehlern, wie falschem Datum in der Betreffzeile oder falscher Liniennummer, behaftet. Auch die Notwendigkeit die Störungsmeldungen jeden Tag daraufhin zu überprüfen, ob jeweils die weitreichendste Auswirkung jeden Störfalls aufgenommen wurde und nicht jede Aktualisierung eines Vorfalls als neuer Vorfall eingetragen wird, verlangt die Kontrolle durch einen geschulten Anwender. Der Vorteil der Nutzung der Störmeldedaten liegt in ihrer Aussagekraft. Die DB AG verweigert die Aussage über die Infrastrukturqualität (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE 2011), die S-Bahn München nennt aber in den Störmeldungen zumeist konkrete Probleme, wie Ausfall einer Weiche am Ostbahnhof oder Störung eines Schrankenanlage auf der S1. In einem gewissen Rahmen lässt sich so der Zustand der Infrastruktur einschätzen.

Während bei den Fahrplandaten offene Standards etabliert sind, trifft dies auf die Störmeldedaten nicht zu. Infrastrukturihaber können ihre Daten zu Betriebsgeheimnissen erklären und somit jede Einsicht verhindern. Damit bleibt die arbeitsaufwendige Vorgehensweise

zur Katalogisierung der Störungsmeldungen auch zukünftig bestehen. Bei Ausschreibungen hingegen könnte die Behörde auf einer Veröffentlichung der Fahrplandaten in automatisiert lesbaren Datenformaten bestehen (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE 2011). Immer mehr Verkehrsunternehmen veröffentlichen ihre Daten von sich aus (GOOGLE PROJECT HOSTING 2014).

## 10 FAZIT

Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu untersuchen ob ein Umweltverband durch die Analyse freier und frei verfügbarer Daten belastbare Aussagen über die Qualität von Nahverkehrssystem treffen kann. Zuerst wurden die theoretischen Grundlagen der Beschreibung und Analyse von Netzwerken erläutert. Im nächsten Schritt wurde deren Implementierung in GI-Systeme dargestellt und anschließend die Umsetzung anhand dreier Untersuchungen beschrieben. Das australische SNAMUTS-Projekt hat sich dabei als das umfassendste dieser Modelle gezeigt. Es vereint die wissenschaftliche Entwicklung mit ständig fortschreitenden Analysen weiterer Städte. Zudem war es das einzige vorgestellte Modell, das sich auch mit dem Großraum München beschäftigt hat. Die Ergebnisse von SNAMUTS für München wurden mit den eigenen Analyse-Resultaten verglichen.

Nach den eigenen Untersuchungen ergibt sich ein differenziertes Bild. Werden zu Analysezwecke nur Daten verwendet, die ohne aufwendiges Aufbereiten verwendet werden können, so zeigt sich die Beschränktheit der für München verfügbaren Quellen. Auch wenn OpenStreetMap im Bereich Schienenverkehr eine vollständige Abbildung der tatsächlichen Verhältnisse erreicht, so sind weitere Datenbestände wie Bushaltestellen, Nahverkehrslinien oder Gebäudebestand, entweder mit Fehlern behaftet oder es fehlt die entscheidende Attributzuweisung. Die Stärke der Analysen mit OSM-Daten liegt in der Einfachheit der berechneten Indikatoren. Da aufwendige kumulierte Indikatoren, wie bei SNAMUTS eine Vielzahl von Daten fordern, die nicht verfügbar sind, wurde auf einfache Erreichbarkeitsindikatoren zurückgegriffen. Die Berechnung der Einzugsbereiche um die Haltestellen des Münchner Nahverkehrs ist in der Lage, nicht ausreichend erschlossene Gebiete aufzuzeigen, und bleibt in seiner Aussage gleichzeitig auch für den Laien klar verständlich. Dies erlaubt Umweltverbänden, unter Zuhilfenahme kartographischer Darstellungen, Lobbying für ein besseres ÖPNV-Angebot zu betreiben. Es bleibt spannend abzuwarten, ob freie Geodatenbestände wie OSM, wie von einigen Autoren angedeutet, die Lücken schnell füllen können und somit den Abstand zu proprietären Datenanbietern schließen können.

Der Einsatz weiterer Datenbestände, die nicht aus freien aber aus frei verfügbaren Quellen stammen, offenbart tief greifende Erkenntnisse. Der Einsatz von Fahrplandaten, die eigenständig gesammelt, in eine Datenbank eingegeben und ausgewertet wurden, zeigt ähnliche Ergebnisse, wie hoch komplexe SNAMUTS-Indikatoren. Allerdings könnte dieser

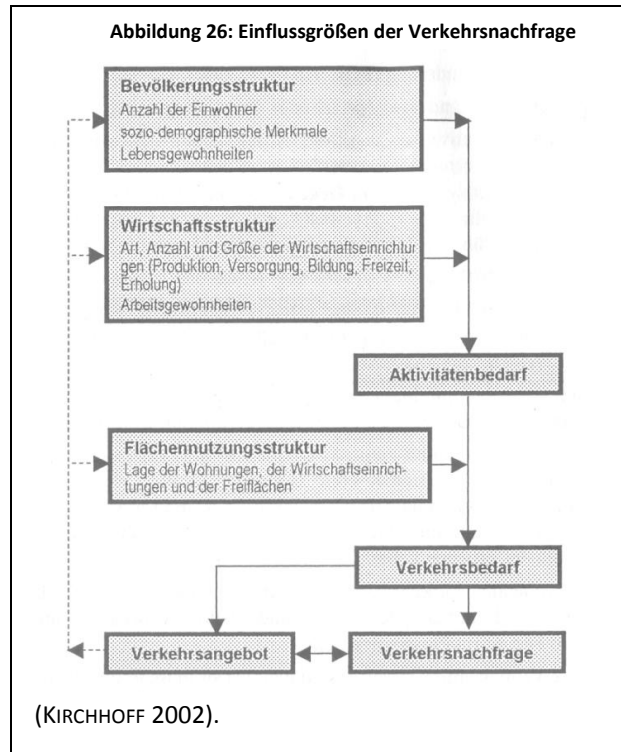
Teil der Analyse auch auf freien Daten basieren. Viele Verkehrsunternehmen bieten ihre Daten bereits im GTFS-Standard an und erleichtern damit den Zugang zu wertvollen Informationen. Ähnlich aufschlussreich wie die Resultate der Fahrplandaten ist die Auswertung der Echtzeit-Informationen von Fahrgästen dienenden Störungsmeldungen der S-Bahn München. Hier zeigt sich deutlich der Zusammenhang zwischen Infrastrukturausstattung der jeweiligen Linie und ihrer Anfälligkeit für Störungen. Es konnte auch gezeigt werden, dass eine hohe Zahl von Meldungen zu einer Strecke allein noch keine Aussage über die Qualität erlaubt. Die Nutzung von Störmeldedaten wird wahrscheinlich auch zukünftig nicht aufgegeben werden können, da Infrastrukturdaten im Gegensatz zu Fahrplandaten von Verkehrsbetrieben auch zukünftig Betriebsgeheimnisse bleiben werden. Diese Analysen und ihre Resultate sind für Nichtregierungsorganisationen, die sich im Bereich Verkehr und Mobilität engagieren, von hohem Nutzen. Sie erlauben Einblicke in die Infrastruktur, die ihnen sonst auf Grund von Betriebsgeheimnissen verwehrt bleiben. Jene Praxis, Qualitätsberichte zur Infrastruktur als Betriebsgeheimnisse zu deklarieren, verhindert, dass Umweltverbände qualifiziert und mit Quellenangabe auf Missstände und Mängel hinweisen können. Die Auswertung der Störmeldungen ist daher für Nichtregierungsorganisation ein Ersatz für diese Betriebsgeheimnisse und erlaubt eine seriöse Betrachtung des Zustands. Somit sind NGO in der Lage Druck zur Verbesserung der Infrastruktur aufzubauen. Dies kann dem System zu höherer Verlässlichkeit verhelfen und kommt somit dem Fahrgast zugute. Darüber hinaus erhöht ein zuverlässiges Angebot auch die Akzeptanz des ÖPNV und führt zu höheren Nutzerzahlen. Aus Sicht von Umweltverbänden ist dies wünschenswert.



## 11 ANNEX

### 11.1 EINFLUSSFAKTOREN AUF VERKEHRSNACHFRAGE

Auch KIRCHHOFF ist der Ansicht, dass Verkehr nur stattfindet, wenn eine Aktivität an dem Ort an dem sich eine Person oder Gut befindet, nicht ausgeführt werden kann. Aus seiner Sicht sind bei einer Ortsveränderung zwei Punkte zu beachten, ob eine Person oder ein Gegenstand seinen Ort verändert bzw. durch was die Ortsveränderung veranlasst wird, also privat oder geschäftlich. Da in der vorliegenden Arbeit der Wirtschaftsverkehr eine untergeordnete Rolle spielt, der Warentransport zum Supermarkt per U-Bahn kann als nicht existent bezeichnet werden, wird im Folgenden nur auf die „privaten“ Aktivitäten eingegangen. Zu diesen zählt KIRCHHOFF die Funktionen: Wohnen, Arbeiten, Bilden, Versorgen, Erledigen und Freizeit (KIRCHHOFF 2002).



### 11.2 VERKEHRSMITTEL UND MODAL SPLIT

Als Verkehrsmittel werden die technischen Einrichtungen zur Beförderung von Personen, Gütern und Nachrichten bezeichnet, d.h. die Transportgeräte (Automobil, Schiff, Flugzeug etc.). Deren jeweilige Bedeutung, d.h. ihr Anteil am Gesamtverkehr, wird auch als Modal Split bezeichnet (NUHN & HESSE 2006). Es werden

**Abbildung 27: Organisationsform und Verkehrsweg**

		Organisationsform	
		individuell	öffentlich
Verkehrsweg	Schiene	X	Fernbahn S-Bahn U-Bahn Stadtbahn Straßenbahn *)
	Straße	Kfz, Krad Fahrrad Fußgänger	Bus Taxi

\*) Straßenbahn:  
Verkehrsweg Schiene und Straße

Unterscheidung zwischen Verkehrsmitteln (KIRCHHOFF 2002)

bei den Verkehrsmitteln zwei Organisationsformen unterschieden. Zum einen gibt es private Verkehrsmittel, wie Fahrrad, Motorrad oder Pkw, denen Öffentliche Verkehrsmittel (Fern- bzw. Regionalzüge, S-Bahnen, Busse) gegenüberstehen. Dabei fällt auf, dass spurgebundene Verkehrsmittel exklusiv im Öffentlichen Verkehr auftreten.

### 11.3 DEFINITION TRANSIT ORIENTED DEVELOPMENT (TOD)

Unter dem Begriff Transit Oriented Development (TOD) verstecken sich viele Definitionen. Im weitesten Sinn geht es darum, dass durch städtebauliche Maßnahmen Gebiete mit relativ hoher Dichte und Kompaktheit sowie Funktionsmischung entstehen, die an den ÖPNV angebunden sind. Dazu werden bei der Planung von TOD-Projekten besonderes Augenmerk auf die Verbindung von Bebauung, Arbeitsplätzen, Aktivitätszentren und öffentlichen Einrichtungen gelegt. Diese neuen Quartiere sind dann so anzulegen, dass sie optimal mit bestehenden oder neuen Halten des ÖPNV harmonisieren. Dieses Konzept an sich ist nicht neu, sondern wurde schon Mitte des 19. Jahrhunderts in England und in den USA praktiziert. Es wurde in den letzten Jahren vor allem in den USA, wie beispielsweise in Denver, wiederentdeckt (CITY OF DENVER 2006, KNOWLES 2012, RATNER & GOETZ 2013)

### 11.4 DEFINITIONEN ERREICHBARKEIT

NUHN UND HESSE.: VERKEHRSGEOGRAPHIE:

Erreichbarkeit wird allgemein als **Zugang** zu **Ressourcen** bzw. **Gelegenheiten** verstanden, der den Individuen in unterschiedlicher Form gegeben ist, bspw. entlang einer zentralörtlichen Hierarchie. Sie wird gemessen an der **Zahl** von **Gelegenheiten** in einer **Raumeinheit**, die in einer bestimmten **Zeiteinheit** erreichbar sind. Neben der **räumlichen Distanz** zur **Quelle** und der **Verfügbarkeit** von **Verkehrsmitteln** (die wiederum abhängt von Einkommen, geschlechtsspezifischer Arbeitsteilung, persönlicher Disposition etc.) ist die Erreichbarkeit zunehmend auch durch spezifische **Raum-** und **Zeitwiderstände** bestimmt – hierunter wurden früher vor allem Mängel in der Verkehrsinfrastrukturausstattung verstanden; heute sind dies insbesondere Staus sowie Transferprobleme an den Schnittstellen der Verkehrsträger. Es handelt sich hier um einen klassischen Begriff der Verkehrswissenschaften und Verkehrsgeographie – auch weil Erreichbarkeit verstärkt als **Zielkategorie** an die Stelle

einer beliebigen Erhöhung von **Motorisierung** oder **Geschwindigkeit** getreten ist (eigene Hervorhebung/ NUHN & HESSE 2006).

BRUNOTTE: LEXIKON DER GEOGRAPHIE

Erreichbarkeit, auch als **Verkehrszentralität** bezeichnet, ist ein Maß für die **Lagequalität** eines Ortes bzw. einer Raumeinheit in Bezug auf potentielle **Personenfahrten** und/oder **Gütertransporte** von bzw. nach anderen Orten (Raumeinheiten). Die Erreichbarkeit hängt direkt von Art und Umfang der **Verkehrerschließung** (der Bereitstellung von Verkehrsmitteln, deren Vernetzung, Ausbau und Plangeschwindigkeit der Verkehrswege) und indirekt von der **Siedlungs-** und **Raumstruktur** ab. Eine überregional gute Erreichbarkeit stellt für die Wohnbevölkerung ein hohes **Kontakt-** und **Aktivitätspotential** und für die Wirtschaft einen **Standortvorteil** im interregionalen Wettbewerb dar. Der Zusammenhang zwischen Erreichbarkeit - als Kriterium für die Verkehrsinfrastruktur - und Wirtschaftskraft von Regionen ist empirisch evident. Es gibt zahlreiche Indikatoren zur Messung von Erreichbarkeit. Im einfachsten Fall dient die **Distanz** oder **Reisezeit** (in Bezug auf potentielle Quell- und Zielorte) oder die innerhalb einer bestimmten Reisezeit erreichbare Bevölkerung als Indikator. Komplexere Indikatoren beziehen die **Attraktivität** potentieller Zielorte oder die regionale Wirtschaftskraft als Gewichtungsfaktoren ein (eigene Hervorhebung/ BRUNOTTE et al. 2002).

KNOX UND MARSTON: HUMANGEOGRAPHIE:

Kurzdefinition:

Die an einem Ort gegebene Möglichkeit, in Kontakt und Interaktion zu anderen Orten zu treten.

Langfassung:

Erreichbarkeit – In Anbetracht der Tatsache, dass Menschen bei vielen Entscheidungen nach dem Prinzip der Nähe handeln, ist Erreichbarkeit von zentraler Bedeutung. In der Geographie wird Erreichbarkeit in der Regel in Kategorien des **relativen Standorts** definiert, und zwar als die an einem Ort gegebenen Möglichkeiten, in **Kontakt** und **Interaktion** zu anderen Orten zu treten. Erreichbarkeit impliziert **Nähe** zu etwas; da die Nähe und Erreichbarkeit grundsätzliche Bedeutung für den **Standortnutzen** besitzen, üben **Distanzen** starken

Einfluss auf das Verhalten von Menschen aus. Distanz ist ein wichtiger, wenn auch längst nicht der einzige Aspekt von Erreichbarkeit.

**Konnektivität** (oder Verknüpftheit) ist ein weiterer wichtiger Aspekt von Erreichbarkeit, denn Kontakt und Interaktion hängen von Übertragungs- und Verkehrsnetzwerken wie Straßen, Autobahnen, Telefonverbindungen oder Übertragungsfrequenzen ab. Gute Erreichbarkeit ist folglich nicht nur eine Funktion von Distanz, sondern auch eine Funktion der **Leistungsfähigkeit** von **Übertragungs-** und **Transportnetzwerken**. Die Netzwerke kommerzieller Fluglinien sind dafür ein anschauliches Beispiel. Städte, die als Drehkreuze des Flugverkehrs fungieren, besitzen eine bedeutend bessere Erreichbarkeit als Städte, die weniger häufig oder überhaupt nicht angefliegen werden.

Erreichbarkeit ist darüber hinaus oftmals eine Funktion **ökonomischer, kultureller** und **sozialer Faktoren**. Mit anderen Worten: Relative Vorstellungen und Einschätzungen von Entfernungen haben für Entscheidungen häufig denselben Stellenwert wie absolute Distanzen. Eine nahegelegene Einrichtung, beispielsweise ein Krankenhaus, ist für uns nur dann erreichbar, wenn wir die Behandlung in diesem Krankenhaus bezahlen können und wir das Gefühl haben, dort in sozialer und kultureller Hinsicht gut aufgehoben zu sein und so weiter. Ein anderes Beispiel: Eine Kindertagesstätte, die sich nur ein paar Straßen von der Wohnung einer allein erziehenden Person befindet, ist nicht wirklich erreichbar, wenn sie erst nach Arbeitsbeginn des allein erziehenden Elternteils öffnet. Dasselbe gilt, wenn die erziehende Person von dieser Einrichtung den Eindruck hat, dass das Personal, die Kinder oder andere Eltern ihren Wunschvorstellungen nicht entsprechen (eigene Hervorhebung/ KNOX & MARSTON 2001).

**11.5 AUSWIRKUNGEN DER STÖRUNGEN**

**Tabelle 3: Auflistung der Störungsursache nach Linie**

	Grund für die Störungsmeldung							
	Störungen gesamt	Betriebliche Einschränkungen	Polizei-/Rettungseinsatz	Personen im Gleis	Sonstiges	Stellwerksausfall	Technik Strecke	Technik Triebfahrzeug
Gesamtnetz	1316	188	311	139	87	85	428	78
Stammstrecke	145	1	69	15	6	5	34	15
Freising S1	140	2	28	15	28	7	52	8
S2 West Dachau	158	68	19	11	4	9	37	10
S2 Ost Erding	78	1	21	8	1	8	33	6
S3 West Mammendorf	121	21	27	14	12	5	33	9
S3 Ost Deisenhofen	99	20	21	9	10	5	29	5
S4 West Geltendorf	64	0	15	11	1	7	27	3
S4 Ost Ebersberg	72	0	20	14	3	9	22	4
S6 West Tutzing	75	3	21	13	5	5	24	4
S7 West Wolfratshausen	56	0	18	6	2	3	23	4
S7 Ost Kreuzstraße	78	1	14	9	3	7	41	3
S8 West Herrsching	174	71	21	9	6	12	49	6
S8 Ost Flughafen	56	0	17	5	6	3	24	1

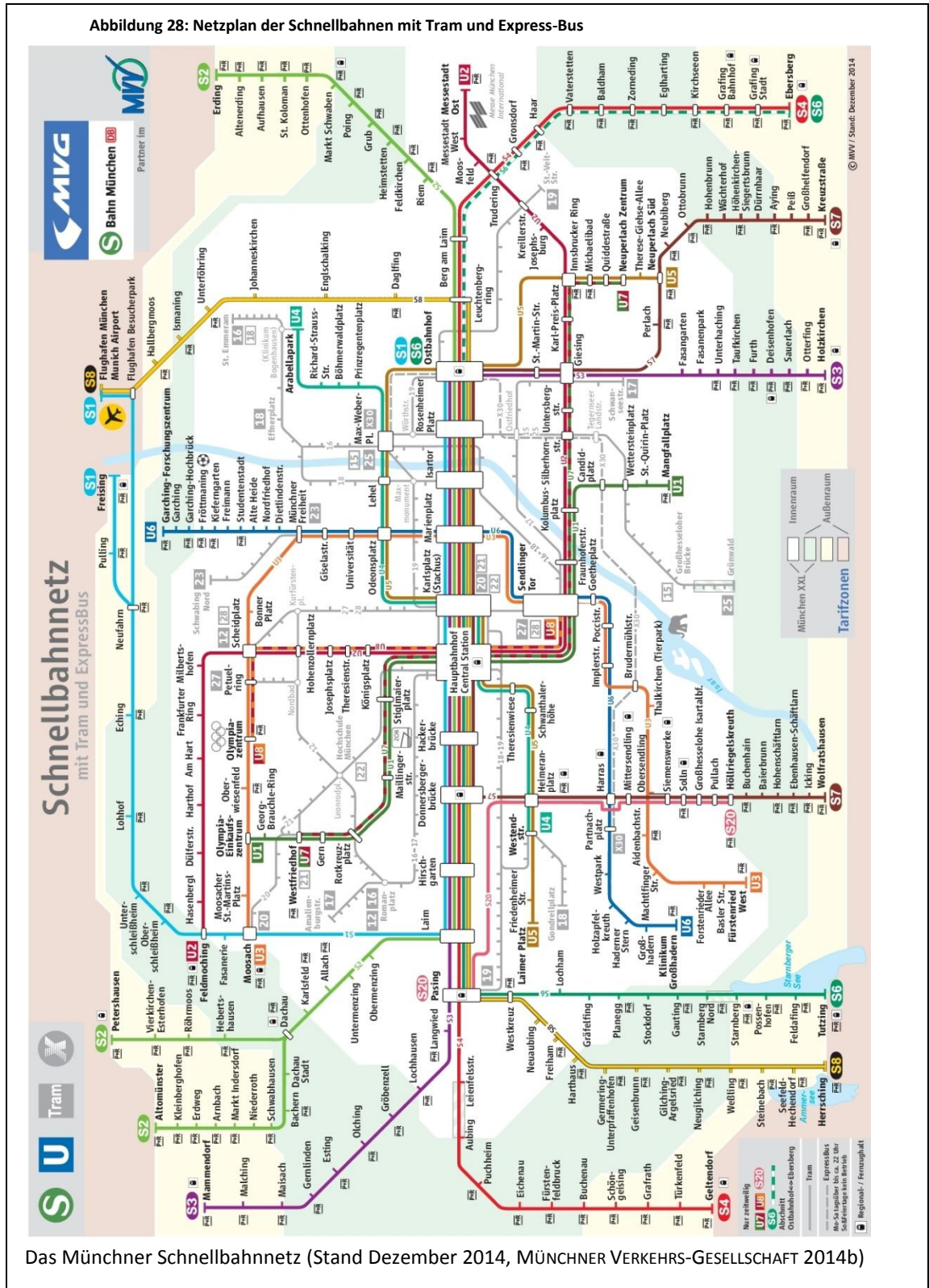
Aufstellung der Gründe, die in den Störmeldungen genannt wurden, nach Linie (eigene Darstellung, S-BAHN MÜNCHEN o.J.),

**11.6 MVG, MVV UND DAS MÜNCHNER LINIENNETZ**

Die Münchner Verkehrs-Gesellschaft (MVG) ist ein Verkehrsunternehmen und Teil der Stadtwerke München (SWM). Sie betreiben die kommunalen Verkehrsmittel U-Bahn und Tram sowie die innerstädtischen Bus (alle Busse in München bis zur Liniennummer 199). Der Münchner Verkehrs- und Tarifverbund (MVV) koordiniert die Zusammenarbeit zwischen der MVG und den anderen im Großraum München tätigen Unternehmen, wie der S-Bahn München AG. Hauptgrund der Gründung des MVV im Jahr 1971 war ein einheitliches Tarifsystem zwischen der damaligen deutschen Bundesbahn als Betreiber der S-Bahn und der Stadt München einzuführen. Die Landkreise der Region sind als Gesellschafter in den MVV integriert (MÜNCHNER VERKEHRS- UND TARIFVERBUND 2013b, MÜNCHNER VERKEHRS- UND TARIFVERBUND 2013a, MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2010, MÜNCHNER VERKEHRS- UND TARIF-

VERBUND 2011). Die Abbildung zeigt das Schnellbahnnetz der MVG und S-Bahn München. Zudem sind die Trambahnlinien und die wenigen Express-Buslinien verzeichnet (MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2014b).

Abbildung 28: Netzplan der Schnellbahnen mit Tram und Express-Bus



Das Münchner Schnellbahnnetz (Stand Dezember 2014, MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT 2014b)

## 12 LITERATUR

- ABRIL, M., BARBER, F., INGOLOTTI, L., SALIDO, M., TORMOS, P., LOVA, A. (2008): An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44, (5), 774–806.
- ALEXANDERSON, G. (2006): About the cover: Euler and Königsberg's bridges: a historical review. *American Mathematical Society* 43, (4), 567–573.
- ARRIBAS-BEL, D. (2014): Accidental, open and everywhere: Emerging data sources for the understanding of cities. *Applied Geography* 49, 45–53.
- AYDEMIR-KENGEROGLU, S. (o.J.): Unterschiedliches Wahlverhalten in München - Eine Analyse der Landtagswahl 2003 auf Basis der Stimmbezirke, 16 S., Download unter [https://www.muenchen.de/rathaus/dms/Home/Stadtinfos/Statistik/wahlen/bericht\\_e/mb040401.pdf](https://www.muenchen.de/rathaus/dms/Home/Stadtinfos/Statistik/wahlen/bericht_e/mb040401.pdf). (01.02.2015).
- BACKES, T. (2014): Lkw-Fahrer rammt Bahn-Unterführung. *Süddeutsche Zeitung*, (29.08.2014).
- BARABÁSI, A., ALBERT, K. (1999): Emergence of Scaling in Random Networks. *Science* 286, (5439), 509–512.
- BAYERISCHE EISENBAHNGESELLSCHAFT (BEG) (2014): BEG leitet Neuvergabe der Verkehre der S-Bahn München ein, Download unter <http://beg.bahnland-bayern.de/presse/pressemitteilungen/beg-leitet-neuvergabe-der-verkehre-der-s-bahn-muenchen-ein>. (18.02.2015).
- BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (o.J.): OpenData, Download unter <http://vermessung.bayern.de/opendata>. (16.01.2015).
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND MEDIEN, ENERGIE UND TECHNOLOGIE (2013): Zentrale Orte, 4 S., Download unter [http://www.landesentwicklung-bayern.de/fileadmin/user\\_upload/landesentwicklung/Dokumente\\_und\\_Cover/Instrumente/LEP\\_08\\_2013/Anhang\\_1\\_-\\_Zentrale\\_Orte.pdf](http://www.landesentwicklung-bayern.de/fileadmin/user_upload/landesentwicklung/Dokumente_und_Cover/Instrumente/LEP_08_2013/Anhang_1_-_Zentrale_Orte.pdf). (01.02.2015).
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE (o.J.): Leitlinien zur Nahverkehrsplanung in Bayern, 42 S., Download unter [http://www.demografie-leitfaden-bayern.de/fileadmin/user\\_upload/demografie-leitfaden/dokumente/LEITLINIE98.pdf](http://www.demografie-leitfaden-bayern.de/fileadmin/user_upload/demografie-leitfaden/dokumente/LEITLINIE98.pdf). (01.02.2015).
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE (2011): Antwort auf schriftliche Anfrage - Qualität im Schienenpersonenverkehr.

- BEIRÃO, G., SANSFIELD CABRAL, J. (2007): Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study. *Transport Policy* 14, (6), 478–489.
- BRAND, K., GROOTE-BIDLINGMAIER, C. VON, HUTNER, P., KAISER, P., PEYKER, I., STRAUB, A. (2012): ArcGIS 10.1 und 10.0, Wichmann, Berlin [u.a.], XX, 705 S.
- BRUNOTTE, E., GEBHARDT, H., MEURER, M., MEUSBURGER, P., NIPPER, J. (2002): Lexikon der Geographie, Wiss. Buchges, Darmstadt, VI, 462 S.
- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND (BUND) (2014a): Autoverkehr, Download unter [http://www.bund.net/themen\\_und\\_projekte/mobilitaet/autoverkehr/](http://www.bund.net/themen_und_projekte/mobilitaet/autoverkehr/). (26.09.2014).
- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND (BUND) (2014b): Rad, Download unter [http://www.bund.net/themen\\_und\\_projekte/mobilitaet/stadtverkehr/rad/](http://www.bund.net/themen_und_projekte/mobilitaet/stadtverkehr/rad/). (26.09.2014).
- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND (BUND) (2015): Ansprechpartner in den Referaten, Download unter [http://www.bund.net/ueber\\_uns/bundesgeschaefsstelle/politik/](http://www.bund.net/ueber_uns/bundesgeschaefsstelle/politik/). (15.02.2015).
- BUNDESZENTRALE FÜR POLITISCHE BILDUNG (2011): Open Data - Was sind offene Daten?, Download unter <http://www.bpb.de/gesellschaft/medien/opendata/64055/was-sind-offene-daten?p=all>. (23.01.2015).
- BUNTING, T., FILION, P. (2006): Canadian cities in transition – Local through global perspectives, Oxford University Press, Don Mills, Ont., New York. 3. Aufl., xi, 532.
- BURDETT, R., KOZAN, E. (2006): Techniques for absolute capacity determination in railways. *Transportation Research Part B: Methodological* 40, (8), 616–632.
- CATALA, M. (2011): Expanding the Google Transit Feed Specification to Support Operations and Planning, 64 S., Download unter <http://www.nctr.usf.edu/wp-content/uploads/2012/02/77902.pdf>. (12.12.2014).
- CATS, O., JENELIUS, E. (2012): Vulnerability analysis of public transport networks: A dynamic approach and case study for Stockholm. *The 5th International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR2012) 2012*, 535–544.
- CHAN, S. (2008): Google Transit Expands to New York. *NEW YORK TIMES*, HRSG., New York, Download unter [http://cityroom.blogs.nytimes.com/2008/09/23/google-tool-gives-new-york-transit-help/?\\_r=0](http://cityroom.blogs.nytimes.com/2008/09/23/google-tool-gives-new-york-transit-help/?_r=0). (12.12.2014).
- CHEN, A., YANG, C., KONGSOMSAKSAKUL, S., LEE, M. (2007): Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. *Networks and Spatial Economics* 7, (3), 241-256.



- CITY OF DENVER (2006): Transit Oriented Development Strategic Plan, 87 S., Download unter <http://ctod.org/pdfs/2006TODStrategicPlanDenver.pdf>. (18.02.2015).
- CITY OF EDINBURGH COUNCIL (CEC): Edinburgh by Numbers 2014.
- CITY OF EDINBURGH COUNCIL (CEC) (2007): Local Transport Strategy 2007-2012, Edinburgh.
- COAST, S. (2010): Microsoft Imagery details, Download unter <https://blog.openstreetmap.org/2010/11/30/microsoft-imagery-details/>. (09.01.2015).
- COLEMAN, D., GEORGIADOU, Y., LABONTE, J. (2009): Volunteered Geographic Information: The Nature and Motivation of Producers. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research* 4, 332–358.
- CURTIS, C., SCHEURER, J. (2010): Planning for sustainable accessibility: Developing tools to aid discussion and decision-making. *Progress in Planning* 74, (2), 53–106.
- CURTIS, C., SCHEURER, J., MELLOR, R. (2012a): Spatial Network Analysis for Multimodal Urban Transport Systems (SNAMUTS). In: HULL, A., SILVA, C., BERTOLINI, L., Hrsg., *Accessibility Instruments for Planning Practices*, 48–55.
- CURTIS, C., SCHEURER, J., MELLOR, R., Hrsg. (2012b): Spatial Network Analysis for Multimodal Urban Transport Systems (SNAMUTS). *Accessibility Instruments for Planning Practice*.
- DERRIBLE, S., KENNEDY, C. (2010a): Characterizing metro networks: state, form, and structure. *Transportation* 37, (2), 275-297.
- DERRIBLE, S., KENNEDY, C. (2010b): The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 389, (17), 3678–3691.
- DERRIBLE, S., KENNEDY, C. (2011): Applications of Graph Theory and Network Science to Transit Network Design. *Transport Reviews* 31, (4), 495–519.
- DEUTSCHE UMWELTHILFE (DUH) (2014): Deutsche Umwelthilfe siegt im Streit um saubere Luft, Download unter <http://www.duh.de/2445+M5d0fd53fce3.html>. (20.11.2014).
- DRDLA, P. (2006): Statische Fahrgastinformation bleibt auch kuenftig wichtig. *Der Nahverkehr* 24, (11), 66–68.
- DZIEKAN, K., KOTTENHOFF, K. (2007): Dynamic at-stop real-time information displays for public transport: effects on customers. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 41, (6), 489–501.
- ELWOOD, S., GOODCHILD, M., SUI, D. (2012): Researching Volunteered Geographic Information: Spatial Data, Geographic Research, and New Social Practice. *Annals of the Association of American Geographers* 102, (3), 571–590.

- FELSNER, S. (o.A.): Graphentheorie, 115 S., Download unter <http://page.math.tu-berlin.de/~felsner/Lehre/GrTh05/Graphentheorie.pdf>. (18.11.2014).
- FERBER, C. VON, HOLOVATCH, T., HOLOVATCH, Y., PALCHYKOV, V. (2007): Network harness: Metropolitan public transport. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 380, (0), 585–591.
- FERBER, C. VON, HOLOVATCH, T., HOLOVATCH, Y., PALCHYKOV, V. (2009): Public transport networks: empirical analysis and modeling. *The European Physical Journal B* 68, (2), 261–275.
- FERRIS, B., WATKINS, K., BORNING, A. (2010): Location-Aware Tools for Improving Public Transit Usability. *IEEE Pervasive Computing* 9, (1), 13–19.
- FLANAGIN, A., METZGER, M. (2008): The credibility of volunteered geographic information. *GeoJournal* 72, (3-4), 137–148.
- FLEGENHEIMER, M. (2012): Subways May Be Shut for Several Days After Hurricane Sandy. *NEW YORK TIMES*, HRSG., New York, Download unter [http://www.nytimes.com/2012/10/31/nyregion/subways-may-be-shut-for-several-days-after-hurricane-sandy.html?\\_r=0](http://www.nytimes.com/2012/10/31/nyregion/subways-may-be-shut-for-several-days-after-hurricane-sandy.html?_r=0). (05.09.2014).
- GARRISON, W., MARBLE, D. (1962): The structure of transportation networks, The Center, Evanston, Ill., xvi, 100.
- GARRISON, W., MARBLE, D. (1964): Factor-analytic Study of the Connectivity of a Transportation Network. *Papers in Regional Science* 12, (1), 231–238.
- GARRISON, W., MARBLE, D. (1965): A prolegomenon to the forecasting of transportation development, Transportation Center, Northwestern University, Evanston, Ill., xiii, 123.
- GEOFABRIK (2014a): Das Unternehmen, Download unter <http://www.geofabrik.de/de/geofabrik/geofabrik.html>. (16.01.2015).
- GEOFABRIK (2014b): Oberbayern, Download unter <http://download.geofabrik.de/europe/germany/bayern/oberbayern.html>. (12.09.2014).
- GOETZ, M. (2012): OpenStreetMap - Datenqualität und Nutzungspotential für Gebäudebestandsanalysen. In: MEINEL, G. et al., Hrsg., *Flächennutzungsmonitoring*, Rhombus-Verl., Berlin.
- GOETZ, M., ZIPF, A. (2012): OpenStreetMap in 3D – Detailed Insights on the Current Situation in Germany. *Proceedings of the AGILE'2012 International Conference on Geographic Information Science*, 288–292.
- GOOGLE (o.J.): Transit – Google Maps, Download unter <http://maps.google.com/landing/transit/cities/index.html>. (12.12.2014).

- GOOGLE (2014): General Transit Feed Specification Reference, Download unter <https://developers.google.com/transit/gtfs/reference>. (12.12.2014).
- GOOGLE PROJECT HOSTING (2014): List of publicly-accessible transit data feeds -, Download unter <https://code.google.com/p/googletransitdatafeed/wiki/PublicFeeds>. (12.12.2014).
- GOULD, P. (1969): Spatial Diffusion – Ressource paper No. 4, 80 S., Download unter <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED120029.pdf>. (21.09.2014).
- HADAS, Y. (2013): Assessing public transport systems connectivity based on Google Transit data. *Journal of Transport Geography* 33, (0), 105–116.
- HADAS, Y., RANJITKAR, P. (2012): Modeling public-transit connectivity with spatial quality-of-transfer measurements. *Special Section on Rail Transit Systems and High Speed Rail* 22, (0), 137–147.
- HARROD, S. (2009): Capacity factors of a mixed speed railway network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45, (5), 830–841.
- HARVEY, F. (2013): To Volunteer or to Contribute Locational Information? Toward Labeling for Crowdsourced Geographic Information. In: SUI, D. et al., Hrsg., *Crowdsourcing geographic knowledge. Volunteered geographic information (VGI) in theory and practice*, Springer, Dordrecht, New York, 31–42.
- HAYAKAWA, T., IMI, Y., ITO, T. (2012): Analysis of Quality of Data in OpenStreetMap, 2012 IEEE 14th International Conference on Commerce and Enterprise Computing (CEC), 131–134.
- HECHT, R., KUNZE, C., HAHMANN, S. (2013): Measuring Completeness of Building Footprints in OpenStreetMap over Space and Time. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2, (4), 1066–1091.
- HEINEBERG, H. (2001): *Stadtgeographie – 7 Tabellen*, Schöningh, Paderborn, München [u.a.]. 2. Aufl., 336 S.
- HULL, A., KAROU, S. (2012): Spatial Network Analysis of Public Transport Accessibility (SNAPTA). In: HULL, A., SILVA, C., BERTOLINI, L., Hrsg., *Accessibility Instruments for Planning Practices*.
- JACKSON, S., MULLEN, W., AGOURIS, P., CROOKS, A., CROITORU, A., STEFANIDIS, A. (2013): Assessing Completeness and Spatial Error of Features in Volunteered Geographic Information. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2, (2), 507–530.
- JÄPPINEN, S., TOIVONEN, T., SALONEN, M. (2013): Modelling the potential effect of shared bicycles on public transport travel times in Greater Helsinki: An open data approach. *Applied Geography* 43, (0), 13–24.

- JOEBGES, S. (2014): Zensus 2011 - Ergebnisse für München und das Umland – Schwerpunkt Gebäude- und Wohnungszählung, 9 S., Download unter [http://www.muenchen.de/rathaus/dms/Home/Stadtfinfos/Statistik/bau\\_wohnen/berichte/mb140102.pdf](http://www.muenchen.de/rathaus/dms/Home/Stadtfinfos/Statistik/bau_wohnen/berichte/mb140102.pdf). (17.01.2015).
- JOKAR ARSANJANI, J., HELBICH, M., BAKILLAH, M., HAGENAUER, J., ZIPF, A. (2013): Toward mapping land-use patterns from volunteered geographic information. *International Journal of Geographical Information Science* 27, (12), 2264–2278.
- KANSKY, K. (1963): Structure of transportation networks – Relationships between network geometry and regional characteristics. Univ. of Chicago, Diss--Chicago Ill, Univ. Department of Geography, Chicago, 155 S.
- KAROU, S., HULL, A. (2012): Accessibility Measures and Instruments.
- KAROU, S., HULL, A. (2014): Accessibility modelling: predicting the impact of planned transport infrastructure on accessibility patterns in Edinburgh, UK. *Journal of Transport Geography* 35, (0), 1–11.
- KIMCHI, G. (2013): Bing engages open maps community, Download unter <http://blogs.bing.com/maps/2010/11/23/bing-engages-open-maps-community/>. (09.01.2015).
- KIRCHHOFF, P. (2002): Städtische Verkehrsplanung – Konzepte, Verfahren, Massnahmen, Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. 1. Aufl., XII, 208 S.
- KNOFLACHER, H. (2007): Grundlagen der Verkehrs- und Siedlungsplanung, Böhlau, Wien, 2 v.
- KNOWLES, R. (2012): Transit Oriented Development in Copenhagen, Denmark: from the Finger Plan to Ørestad. *Special Section on Rail Transit Systems and High Speed Rail* 22, (0), 251–261.
- KNOX, P., MARSTON, S. (2001): Humangeographie, Spektrum, Akad. Verl., Heidelberg, Berlin, XXII, 682 S.
- KUMAR, C., HEUTEN, W., BOLL, S. (2015): Visual Overlay on OpenStreetMap Data to Support Spatial Exploration of Urban Environments. *IJGI* 4, (1), 87–104.
- LATORA, V., MARCHIORI, M. (2001): Efficient Behavior of Small-World Networks. *Physical Review Letters* 87, (19).
- LATORA, V., MARCHIORI, M. (2002): Is the Boston subway a small-world network? *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 314, (1-4), 109–113.
- LATORA, V., MARCHIORI, M. (2004): How the science of complex networks can help developing strategies against terrorism. *Chaos, Solitons & Fractals* 20, (1), 69–75.

- LATORA, V., MARCHIORI, M. (2005): Vulnerability and protection of infrastructure networks. *Physical Review E* 71, (1).
- LECHNER, M. (2011): Nutzungspotentiale crowdsource-erhobener Geodaten auf verschiedenen Skalen, Freiburg, Online-Ressource.
- LEI, T., CHURCH, R. (2010): Mapping transit-based access: integrating GIS, routes and schedules. *International Journal of Geographical Information Science* 24, (2), 283–304.
- LESER, H., HAAS, H.-D., MOSIMANN, T., PAESLER, R., unter Mitarbeit von HUBER-FRÖHLI, J. (2001): *Diercke Wörterbuch allgemeine Geographie*, Westermann, Braunschweig, 1037 S ;
- LIN, J., BAN, Y. (2013): Complex Network Topology of Transportation Systems. *Transport Reviews* 33, (6), 658–685.
- LOENEN, B. VAN, ONSRUD, H. (2004): Geographic Data for Academic Research: Assessing Access Policies. *Cartography and Geographic Information Science* 31, (1), 3–17.
- LUCKE, J. VON, GEIGER, C. (2010): Open Government Data – Frei verfügbare Daten des öffentlichen Sektors, 37 S., Download unter <https://www.zu.de/info-de/institute/togi/assets/pdf/TICC-101203-OpenGovernmentData-V1.pdf>. (07.01.2015).
- MISHRA, S., WELCH, T., JHA, M. (2012): Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46, (7), 1066–1085.
- MOLLOY, J. (2011): The Open Knowledge Foundation: open data means better science. *PLoS biology* 9, (12), e1001195.
- MÜLLER, B., ORTH, W. (2005): Bodenvereisung unter schwierigen Randbedingungen: Bodenvereisung unter schwierigen Randbedingungen: Bahnsteigerweiterung beim U-Bahnhof Marienplatz, München/D, 5 S., Download unter <http://www.tunnel.ethz.ch/events/orth>. (16.02.2015).
- MÜNCHEN, L. (o.J.): Offene Daten der LHM, Download unter <http://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Direktorium/IT-Beauftragte/Projekt-E--und-Open-Government/Offene-Daten-der-LHM.html>. (23.01.2015).
- MÜNCHEN, L. (2010): Das Münchner U-Bahn-Netz, 2 S., Download unter [www.muenchen.de/rathaus/dms/Home/Stadtverwaltung/Baureferat/u\\_bahn/pdf/u\\_bahn\\_netz\\_info\\_2010.pdf](http://www.muenchen.de/rathaus/dms/Home/Stadtverwaltung/Baureferat/u_bahn/pdf/u_bahn_netz_info_2010.pdf). (16.02.2015).
- MÜNCHEN, L. (2014): Bevölkerung, Download unter <http://www.muenchen.de/rathaus/Stadtfinfos/Statistik/Bev-lkerung.html>. (20.12.2014).

- MÜNCHEN, L., MÜNCHNER VERKEHRS- UND TARIFVERBUND (MVV) (2010): Mobilität in Deutschland (MiD) – Alltagsverkehr in München, im Münchner Umland und im MVV-Verbundraum.
- MÜNCHNER VERKEHRS- UND TARIFVERBUND (MVV) (2011): Vor 40 Jahren wurde die MVV GmbH gegründet, Download unter <http://www.mvv-muenchen.de/de/aktuelles/presse/pressemitteilungen/detail/datum/2011/04/05/vor-40-jahren-wurde-die-mvv-gmbh-gegruendet-90/index.html>. (18.02.2015).
- MÜNCHNER VERKEHRS- UND TARIFVERBUND (MVV) (2013a): Der Verbundgedanke, Download unter <http://www.mvv-muenchen.de/de/der-mvv/der-verbundgedanke/index.html>. (18.02.2015).
- MÜNCHNER VERKEHRS- UND TARIFVERBUND (MVV) (2013b): Gesellschafter, Download unter <http://www.mvv-muenchen.de/de/der-mvv/gesellschafter/index.html>. (18.02.2015).
- MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT (MVG) (o.J.a): Fahrpläne - Fahrplanauskunft, Linienfahrpläne, Haltestellenpläne, Download unter <http://www.mvg-mobil.de/fahrplaene/>. (23.01.2015).
- MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT (MVG) (o.J.b): Projektinhalt Umbau Sendlinger Tor, Download unter <http://www.mvg-mobil.de/modernisierung/sendlingertor/projektinhalt.html>. (16.02.2015).
- MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT (MVG) (2010): MVG - Mittendrin.
- MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT (MVG) (2012): Google Transit jetzt auch für München: Alle MVG-Linien verfügbar, 2 S., Download unter [http://www.mvg-mobil.de/presse/2012-11-22\\_mvg-pressemeldung.pdf](http://www.mvg-mobil.de/presse/2012-11-22_mvg-pressemeldung.pdf). (23.01.2015).
- MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT (MVG) (2014a): MVG in Zahlen, 2 S., Download unter [https://www.mvg-mobil.de/ueberuns/images/mvg\\_in\\_zahlen\\_s.pdf](https://www.mvg-mobil.de/ueberuns/images/mvg_in_zahlen_s.pdf). (16.01.2015).
- MÜNCHNER VERKEHRS-GESELLSCHAFT (MVG) (2014b): Schnellbahnnetz – mit Tram und Busexpress, 1 S., Download unter <http://www.mvg-mobil.de/netzplaene/images/schnellbahnnetzplan.pdf>. (28.12.2014).
- MUSSO, A., VUCHIC, V. (1988): Characteristics of metro networks and methodology for their evaluation. *Transportation Research Record*, (1162), 22–33.
- NEIS, P., ZIELSTRA, D., ZIPF, A. (2013): Comparison of Volunteered Geographic Information Data Contributions and Community Development for Selected World Regions. *Future Internet* 5, (2), 282–300.
- NEWMAN, M. (2003): The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM Review* 45, (2), 167–256.

- NIGGEMANN, M. (2012): Geschichte des Straßenbaus, Angewandter Straßenbau, Viegweg+Teubner Verlag, 1–15.
- NUHN, H., HESSE, M. (2006): Verkehrsgeographie, Schöningh, Paderborn [u.a.], 379 S.
- O’SULLIVAN, D., MORRISON, A., SHEARER, J. (2000): Using desktop GIS for the investigation of accessibility by public transport: an isochrone approach. *International Journal of Geographical Information Science* 14, (1), 85–104.
- OPENSTREETMAP - DEUTSCHLAND (o.J.a): OpenStreetMap Deutschland FAQs: Fragen und Antworten, Download unter <http://www.openstreetmap.de/faq.html>. (09.01.2015).
- OPENSTREETMAP - DEUTSCHLAND (o.J.b): OpenStreetMap Deutschland: Die freie Wiki-Weltkarte, Download unter <http://www.openstreetmap.de/>. (07.01.2015).
- PALMA, A. DE, LINDSEY, R. (2001): Optimal timetables for public transportation. *Transportation Research Part B: Methodological* 35, (8), 789–813.
- PARTHASARATHI, P., HOCHMAIR, H., LEVINSON, D. (2012): Network structure and spatial separation. *Environment and Planning B: Planning and Design* 39, (1), 137–154.
- PAULLEY, N., BALCOMBE, R., MACKETT, R., TITHERIDGE, H., PRESTON, J., WARDMAN, M., SHIRES, J., WHITE, P. (2006): The demand for public transport: The effects of fares, quality of service, income and car ownership. *Innovation and Integration in Urban Transport Policy* 13, (4), 295–306.
- PORTA, S., CRUCITTI, P., LATORA, V. (2006): The network analysis of urban streets: A dual approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 369, (2), 853–866.
- RAMTHUN, R. (2012): Offene Geodaten durch OpenStreetMap. In: HERB, U., Hrsg., *Open Initiatives. Offenheit in der digitalen Welt und Wissenschaft*.
- RATNER, K., GOETZ, A. (2013): The reshaping of land use and urban form in Denver through transit-oriented development. *Special Section: Analysis and Planning of Urban Settlements: The Role of Accessibility* 30, (0), 31–46.
- REH, W., OMIETANSKI, M. (2014): Ruder rumreißen: PKW-Maut für den Klimaschutz! - Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND), Download unter [http://www.bund.net/themen\\_und\\_projekte/klima\\_und\\_energie/das\\_ruder\\_rumreißen/ruder\\_rumreißen\\_pkw\\_maut\\_fuer\\_den\\_klimaschutz/](http://www.bund.net/themen_und_projekte/klima_und_energie/das_ruder_rumreißen/ruder_rumreißen_pkw_maut_fuer_den_klimaschutz/). (26.09.2014).
- REITER, D. (2013): Öffentlicher Zugang zu MVV-Fahrplan-Daten – Schriftliche Anfrage gemäß § 68 GeschO vom 04.12.2012, eingegangen am 04.12.2012.
- RIETVELD, P., BRUINSMA, F., VUUREN, D. VAN (2001): Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 35, (6), 539–559.

- RODRIGUE, J., COMTOIS, C., SLACK, B. (2009): *The Geography of Transport Systems*, Taylor & Francis.
- RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, E., GARCÍA-PALOMARES, J. (2014): Measuring the vulnerability of public transport networks. *Journal of Transport Geography* 35, (0), 50–63.
- ROSENTHAL, E. (2012): Storm Showed Vulnerability of City's Tunnels, Download unter <http://www.nytimes.com/2012/11/10/nyregion/hurricane-sandy-showed-vulnerability-of-citys-tunnels.html>. (05.09.2014).
- ROTH, M. (2010): How Google and Portland's TriMet Set the Standard for Open Transit Data. *STREETBLOG SF*, HRSG., San Francisco, Download unter <http://sf.streetsblog.org/2010/01/05/how-google-and-portlands-trimet-set-the-standard-for-open-transit-data/>. (12.12.2014).
- S-BAHN MÜNCHEN (o.J.): Streckenagent S-Bahn München, Download unter [http://www.s-bahn-muenchen.de/s\\_muenchen/view/fahrplan/streckenagent.shtml](http://www.s-bahn-muenchen.de/s_muenchen/view/fahrplan/streckenagent.shtml). (23.01.2015).
- SCHEURER, J. (2013): ÖV-Erreichbarkeit und Netzperformance in München und 21 Städten weltweit – Public transport accessibility and network performance in München and a global sample of 21 cities 2013, München, Download unter [http://www.snamuts.com/uploads/2/1/8/1/21813274/presentation\\_in\\_germany\\_-\\_september\\_2013.pdf](http://www.snamuts.com/uploads/2/1/8/1/21813274/presentation_in_germany_-_september_2013.pdf).
- SCHWARZE, B. (2002): Erreichbarkeitsindikatoren in der Nahverkehrsplanung, 52 S., Download unter <http://www.raumplanung.tu-dortmund.de/irpud/fileadmin/irpud/content/documents/publications/ap184.pdf>. (05.09.2014).
- SCHWARZE, B. (2003): Erreichbarkeit mit dem ÖPNV – Eine GIS-gestützte Methode zur Bewertung von Maßnahmen der ÖPNV-Planung, 4 S., Download unter [http://www.corp.at/archive/CORP2003\\_Schwarze.pdf](http://www.corp.at/archive/CORP2003_Schwarze.pdf). (05.09.2014).
- SCOTT, D., NOVAK, D., AULTMAN-HALL, L., GUO, F. (2006): Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography* 14, (3), 215–227.
- SEATON, K., HACKETT, L. (2004): Stations, trains and small-world networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 339, (3-4), 635–644.
- SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS (SNAMUTS) (2014a): Comparison Charts, Download unter <http://www.snamuts.com/comparison-charts.html>. (12.11.2014).
- SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS (SNAMUTS) (2014b): Modelling, Download unter <http://www.snamuts.com/modelling.html>. (11.11.2014).



- SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS (SNAMUTS) (2014c):  
Research Team, Download unter <http://www.snamuts.com/research-team.html>.  
(10.11.2014).
- SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS (SNAMUTS) (2014d):  
SNAMUTS cities, Download unter <http://www.snamuts.com/snamuts-cities.html>.  
(10.11.2014).
- SPATIAL NETWORK ANALYSIS FOR MULTIMODAL URBAN TRANSPORT SYSTEMS (SNAMUTS) (2014e):  
SNAMUTS Ergebnisse für München, Download unter  
<http://www.snamuts.com/munich.html>.
- STADT WIEN (o.A.): Bevölkerungsstand - Statistiken, Download unter  
<https://www.wien.gv.at/statistik/bevoelkerung/bevoelkerungsstand/index.html>.  
(20.12.2014).
- STATISTISCHES AMT MÜNCHEN (o.J.): Der Bestand an Wohngebäuden und Wohnungen 1980 -  
2013.
- SUSNIENÉ, D. (2012): Quality approach to the sustainability of public transport. *Transport* 27,  
(1), 102–110.
- TRIMET (o.A.): TriMet: Making a Difference - Bibiana McHugh: Open Data Evangelist, Port-  
land, Download unter <http://trimet.org/difference/bibi.htm>. (12.12.2014).
- VERWALTUNGSGERICHT POTSDAM (11.04.2014): Akteneinsicht in Prognose- und Ausgangsdaten  
auf Grund des Umweltinformationsgesetzes, Download unter  
<http://openjur.de/u/725348.html>.
- VÖLKLEIN, M. (2015): Pünktlichkeit der S-Bahnen - Streit um die Statistik. *Süddeutsche  
Zeitung*, (06.02.2015).
- VOS, J. DE, WITLOX, F. (2013): Transportation policy as spatial planning tool; reducing urban  
sprawl by increasing travel costs and clustering infrastructure and public transporta-  
tion. *Journal of Transport Geography* 33, (0), 117–125.
- VRAGOVIĆ, I., LOUIS, E., DÍAZ-GUILERA, A. (2005): Efficiency of informational transfer in regular  
and complex networks. *Physical Review E* 71, (3), 036122/1-036122/9.
- VUCHIC, V. (2005): *Urban transit – Operations, planning and economics*, J. Wiley & Sons,  
Hoboken, N.J., xvi, 644.
- WORLD WIDE FUND FOR NATURE (WWF) (2015): Organigramm des WWF Deutschland, Down-  
load unter [http://www.wwf.de/ueber-uns/organisation/organigramm-des-wwf-  
deutschland/](http://www.wwf.de/ueber-uns/organisation/organigramm-des-wwf-deutschland/). (15.02.2015).

ZHANG, J., GOODCHILD, M. (2002): *Uncertainty in geographical information*, Taylor & Francis, London, New York, 266 S.

ZIELSTRA, D., HOCHMAIR, H., NEIS, P. (2013): *Assessing the Effect of Data Imports on the Completeness of OpenStreetMap - A United States Case Study*. *Transactions in GIS* 17, (3), 315–334.

ZIELSTRA, D., ZIPF, A. (2010): *A Comparative Study of Proprietary Geodata and Volunteered Geographic Information for Germany*. *Proceedings of the 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, 1–15.