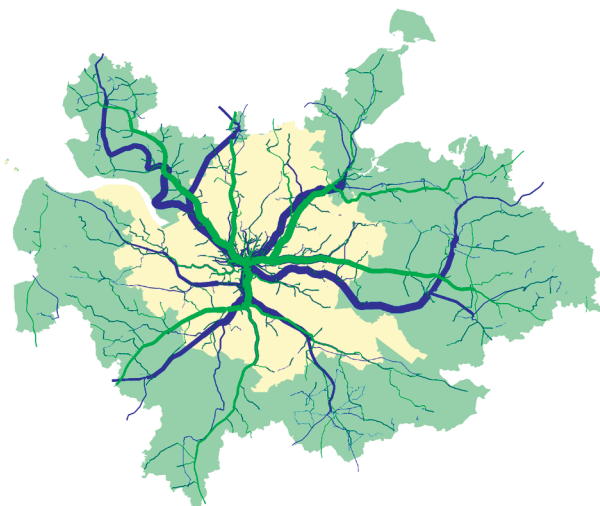


Marcus Peter

Die Berechnung kleinräumiger und multimodaler Erreichbarkeiten auf regionaler Ebene



Band 22

Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik

Schriftenreihe des Instituts für
Verkehrsplanung und Logistik

Herausgegeben von
Heike Flämig und Carsten Gertz
Technische Universität Hamburg

**Die Berechnung kleinräumiger und multimodaler
Erreichbarkeiten auf regionaler Ebene**

Vom Promotionsausschuss
der Technischen Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Marcus Peter

aus Bergen auf Rügen

2021

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz

Prof. Dr.-Ing. Gebhard Wulfhorst

Tag der mündlichen Prüfung:

19.10.2020

DOI: 10.15480/882.3673

urn:nbn:de:gbv:830-882.0140337

HANDLE: 11420/9931

ORCID-ID des Autors: 0000-0002-8536-4561



Creative Commons Lizenzvertrag

Der Text steht, soweit nicht anders gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung 4.0 (CC BY 4.0). Das bedeutet, dass er vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden darf, auch kommerziell, sofern dabei stets der Urheber, die Quelle des Textes und o. g. Lizenz genannt werden. Die genaue Formulierung der Lizenz kann aufgerufen werden unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de>.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet abrufbar über:
<http://dnb.dnb.de>.

© 2021 Institut für Verkehrsplanung und Logistik

Alle Rechte vorbehalten

Satz: Institut für Verkehrsplanung und Logistik

Umschlagbild: Marcus Peter

Marcus Peter

**Die Berechnung kleinräumiger und multimodaler
Erreichbarkeiten auf regionaler Ebene**

Band 22

Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Logistik
Technische Universität Hamburg
herausgegeben von
Heike Flämig und Carsten Gertz

Vorwort

Erreichbarkeit ist ein in Verkehrs-, Stadt- und Regionalplanung weit verbreiteter Begriff, der jedoch bislang in der Planungspraxis nur unzureichend operationalisiert wird. Zwar gibt es insbesondere bei der Planung und Bewertung von Standorten der Daseinsvorsorge eine Reihe von Projekten, in denen GIS-gestützte Erreichbarkeitsauswertungen, überwiegend auf Basis von Reisezeitisochronen, zum Einsatz kommen. Ein allgemeiner Standard zur Berechnung von Erreichbarkeiten hat sich damit keineswegs etabliert. Die inhaltlichen und methodischen Potenziale von Erreichbarkeitsanalysen werden bislang noch nicht genutzt. Ursachen hierfür sind u. a. ein unterschiedliches Verständnis zu Vorgehensweisen, fehlende Standards einer Umsetzung, Diskrepanz zwischen in der Literatur vorhandenen theoretischen Konzepten der Wissenschaft und fehlende Kenntnisse sowie Ressourcen auf der Seite potenzieller Anwender.

Außerhalb von Großstädten ist der Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen für Fragestellungen auf Gemeindeebene in der Regel zu aufwändig. Gemeinden besitzen aber die Zuständigkeit für viele Infrastrukturen und deren Erreichbarkeit und müssen den Zugang ihrer Bevölkerung zu Arbeitsplätzen, Versorgungseinrichtungen, Bildung, medizinischer Versorgung usw. gewährleisten. Vor diesem Hintergrund erscheint es plausibel, Erreichbarkeitsmodelle auf einer gemeindeübergreifenden, regionalen Ebene zu implementieren und damit alle Gebietskörperschaften sowie Verkehrsunternehmen usw. in die Lage zu versetzen, Analysen der Erreichbarkeit durchzuführen.

Hier setzt die Arbeit von Marcus Peter an, in der das übergeordnete Ziel verfolgt wird, Datenstrukturen und Auswertungsroutinen auf regionaler Ebene bereitzustellen und auf dieser Basis kleinräumige und multimodale Auswertungen zu ermöglichen. Die Arbeit beruht in der konkreten Umsetzung eines Erreichbarkeitsmodells auf dem Projekt »Regionale Erreichbarkeitsanalysen« gefördert durch den Förderfond der Metropolregion Hamburg. Die weitergehenden Analysen und Auswertungen gehen deutlich über das Ursprungsprojekt hinaus. Betrachtet werden die räumliche Auflösung aus verschiedenen methodischen Perspektiven,

es werden Vektor- und Rastermodelle verglichen, verschiedene Erreichbarkeitsindikatoren sowie unterschiedliche Aspekte der multimodalen Verkehrsgraphen. Auf dieser Basis gelingen eine Herleitung von Praxisanforderungen sowie die Ableitung von geeigneten Erreichbarkeitsindikatoren, die insbesondere die Anwendung innerhalb der Nahverkehrsplanung aber auch der Daseinsvorsorgeplanung verbessern kann.

Hamburg, im Juni 2021

Carsten Gertz

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrsplanung und Logistik an der Technischen Universität Hamburg entstanden. Die Erreichbarkeit und ihre Berechnung begleiten mich in ihren unterschiedlichen Facetten bereits seit der Phase meiner Masterarbeit im Sommer 2012. In den letzten Jahren konnte ich mein Wissen stetig vertiefen und schließlich die nun vorgelegte Dissertation zum Abschluss bringen.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz, der mir die Erreichbarkeit als einen wesentlichen Faktor in der Verkehrs- und Raumplanung überhaupt erst bekannt gemacht hat. Geschätzt habe ich insbesondere die freie Arbeitsatmosphäre, die es mir ermöglichte, meinen eigenen Weg zu finden. Dies gilt auch für das mir entgegengebrachte Vertrauen bei der eigenständigen Bearbeitung unterschiedlicher Forschungsprojekte. Viele Erfahrungen hätte ich ohne diese Eigenständigkeit nicht gesammelt und auch meine Dissertation greift auf viele dieser Erfahrungen zurück. Schlussendlich wäre die Fertigstellung der Dissertation nicht möglich gewesen, ohne mich innerhalb des letzten Jahres voll auf dieses Ziel zu konzentrieren. Für die Möglichkeit, mir neben meinen sonstigen Tätigkeiten diese Zeit zu nehmen, bin ich besonders dankbar.

Mein weiterer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Gebhard Wulfhorst für zahlreiche Hinweise, die es mir ermöglicht haben, die wesentlichen Erkenntnisse klarer zu benennen und angemessen in den wissenschaftlichen Kontext einzuordnen. Darüber hinaus hat mich der gemeinsame Austausch dazu ermuntert, die sich als nicht zweckmäßig herausgestellten Modellansätze deutlicher zu betonen.

Danken möchte ich außerdem Max Bohnet und Sven Altenburg, die mich während der ersten Zeit am Institut begleiteten und mir das notwendige Vertrauen entgegengebracht haben. Ohne eure Hilfe und Vorarbeiten hätte ich mich nicht in die Erreichbarkeitsmodellierung vertiefen können. Danken möchte ich außerdem Charlotte Pusch und Ole Röntgen für eure konstruktiven und stets positiven Anmerkungen und Motivationshilfen. Mein Dank gilt natürlich auch allen anderen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Verkehrsplanung und Logistik, die mich

über die letzten Jahre begleitet haben und immer aufbauend und Hilfe leistend zur Stelle waren.

Mein Dank gilt auch meinen Freundinnen und Freunden sowie meiner Familie. Ihr habt mich jederzeit unterstützt und immer an mich geglaubt. Mein besonderer Dank gilt Dr. Carolin Hanschke und Verena Wolf, ohne eure fleißigen Korrekturen hätte ich viele Fehler nicht gefunden.

Marcus Peter

Zusammenfassung

Das Ziel von Ortsveränderungen ist vor allem die Befriedigung grundlegender Bedürfnisse in unterschiedlichen Einrichtungen außerhalb der eigenen Wohnung. Die Erreichbarkeit bemisst sich über den auf Wegen zu diesen Einrichtungen anfallenden Aufwand und ist in der öffentlichen Planung daher von herausragender Bedeutung. Von individuellen Merkmalen hängt ab, ob dieser Aufwand zu leisten ist und Ortsveränderungen durchgeführt werden.

Die fortschreitende Computerisierung, die Bereitstellung immer größerer Datenmengen und die Entwicklung freier Software eröffnen der Erreichbarkeitsberechnung stetig neue Möglichkeiten. Dennoch sind Erreichbarkeitsinstrumente in der praktischen Anwendung bisher keineswegs etabliert. Der Aufbau und die Pflege von Erreichbarkeitsmodellen erfordern ein fundiertes Fachwissen und insbesondere die Integration des öffentlichen Verkehrs stellt zahlreiche methodische Herausforderungen bereit. Eine personelle und finanzielle Überforderung der Verwaltungen ist die Folge.

Die vorliegende Forschungsarbeit liefert neue Erkenntnisse für den Aufbau kleinräumiger und regionaler Erreichbarkeitsmodelle. Diese für mehrere Landkreise aufgebauten Modelle sind in der Regel auf Raster- oder Gebäudeebene aufgelöst. Der entwickelte Modellansatz unter Verwendung von ArcGIS und PTV Visum zeigt die prinzipielle Durchführbarkeit multimodaler Erreichbarkeitsberechnungen auf regionaler Ebene und von Tür-zu-Tür. Der Tür-zu-Tür-Ansatz erlaubt die Modellierung von Raumwiderständen für die wesentlichen Etappen auf unterschiedlichen Wegen. Detaillierte Verkehrsgraphen dienen der präzisen Abbildung zahlreicher Raumwiderstände und der Berechnung einfacher und komplexer Erreichbarkeitsindikatoren. Dabei wird auf flexibel anzupassende Modellkonfigurationen zurückgegriffen.

Die Analyse von 22 Nahverkehrsplänen hat gezeigt, dass Erreichbarkeitsstandards und ihre Evaluierung in der Planungspraxis noch die Ausnahme sind. Zudem schöpfen die bereits durchgeführten Berechnungen weder die Möglichkeiten einer hohen räumlichen Auflösung noch die Chancen komplexer Erreichbarkeitsindikatoren vollständig aus. Der

gesamte Bereich der Daseinsvorsorge wird in der Nahverkehrsplanung von regionalen und kleinräumigen Erreichbarkeitsmodellen nur unzureichend adressiert. Der methodische Ansatz des entwickelten Erreichbarkeitsmodells könnte jedoch eine substanzielle Verbesserung herbeiführen.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, inwiefern eine hohe räumliche Auflösung die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen beeinflusst. Mit Hilfe von Variationskoeffizienten wird die Streuung von Erreichbarkeitswerten auf kleinräumiger Ebene am Beispiel des Erreichbarkeitsmodells der Metropolregion Hamburg untersucht. Es wird unterstellt, dass eine geringe Streuung von Erreichbarkeitswerten zu vernachlässigbaren Aggregationsfehlern bei einer Modellvereinfachung führt. Gerade im MIV werden auf Ebene eines 500-Meter-Rasters nur schwache Aggregationsfehler erzeugt, da die auf Reisezeiten basierenden Erreichbarkeitswerte innerhalb von 500-Meter-Zellen nahezu identisch sind. Bei Gelegenheitstypen mit einer geringen Dichte (z. B. zentrale Orte und Bahnhöfe) kann auch ein 1-Kilometer-Raster zur Anwendung kommen. Die Berechnung der Reiseweite oder ein Verzicht auf parkbezogene Reisezeiten sind jedoch nur in Modellen mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung umzusetzen. Zudem haben die Auswertungen gezeigt, dass die Aggregationsfehler von der Einwohnerzahl beeinflusst werden und gerade im Fußverkehr und im ÖV nur Modelle mit einer hohen räumlichen Auflösung zu verwenden sind. Auch die Verwendung einwohnergewichteter Zentroide kann die Präzision der Ergebnisse nicht immer erhöhen. Zwar ist ihre Verwendung bei einer ausschließlichen Erstellung von Erreichbarkeitskarten sinnvoll, gleichzeitig kann sich die Genauigkeit von Erreichbarkeitswerten in Relation zur Bevölkerung sogar mindern. Geometrische Zentroide führen zu einem Überschätzen und gewichtete Zentroide zu einem Unterschätzen der Raumwiderstände in hochaufgelösten Raumbezugssystemen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung eines Rastermodells mit einer Kantenlänge von 100 Metern die Genauigkeit der Erreichbarkeitswerte nicht immer erhöht, die Nutzbarkeit des Modells aber in jedem Fall reduziert. Mit einigen Einschränkungen sind die Ergebnisse zudem auf den Aufbau von Verkehrsmodellen übertragbar, deren Umgang mit räumlichen Interaktionen ähnlichen Verzerrungen ausgesetzt ist.

Eine mögliche Schlussfolgerung für den Umgang mit Erreichbarkeitsmodellen in der Planungspraxis ist die Kombination unterschiedlicher Raumbezugssysteme. Diese wären erst nach der Erreichbarkeitsberechnung zu vereinheitlichen. Denkbar ist die Aggregation der in einem 100-Meter-Raster ermittelten Erreichbarkeitswerte. Ein Informationsverlust wäre bei diesem Verfahren jedoch die Folge. Eine weitere Möglichkeit ist die verlustfreie Disaggregation von Erreichbarkeitswerten in ein höher aufgelöstes Raumbezugssystem. Weiterhin ist es möglich, einen Genauigkeitsverlust in einzelnen Anwendungsbereichen in Kauf zu nehmen. Grundsätzlich ist eine Abwägung zwischen der Modellgenauigkeit und der planerischen Relevanz vorzunehmen. Auf regionaler Ebene könnte daher auf die hochaufgelöste Berechnung von Erreichbarkeiten im Fußverkehr verzichtet werden. Auch die umfassende Verwendung klassifizierter Erreichbarkeitswerte ermöglicht eine deutliche Reduktion der Modellkomplexität, da die Erreichbarkeitsunterschiede einer starken Glättung unterliegen.

Anmerkungen

Das in dieser Arbeit verwendete Erreichbarkeitsmodell wurde im Rahmen des Leitprojektes »Regionale Erreichbarkeitsanalysen« der Metropolregion Hamburg (November 2014 bis August 2017) aufgebaut (Peter & Gertz 2017). Mit diesem Modell wurden in diesem Projekt für das Gebiet der Metropolregion Hamburg kleinräumige Erreichbarkeitsanalysen für alle Verkehrsmodi und zahlreiche Gelegenheitstypen durchgeführt. Diese Erreichbarkeitsanalysen sind frei verfügbar (s. u.). Im Jahre 2019 erfolgte eine erste Aktualisierung aller Erreichbarkeitsanalysen, die erneut aus dem Förderfonds der Geschäftsstelle der Metropolregion Hamburg finanziert wurde.

Zur Beantwortung der einzelnen Forschungsfragen im Rahmen dieser Dissertation wurden am Modell umfangreiche Anpassungen vorgenommen. Diese betreffen die Integration unterschiedlicher räumlicher Auflösungen und die Umsetzung verschiedener Ansätze zur Modellierung der Verkehrsgraphen.

Laufzeit: November 2014 bis August 2017

Antragsteller: Kreis Pinneberg

Förderung: Förderfonds der Geschäftsstelle der Metropolregion Hamburg

Leitung: Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz
(Institut für Verkehrsplanung und Logistik, TU Hamburg)

Bearbeitung: Marcus Peter
(Institut für Verkehrsplanung und Logistik, TU Hamburg)

Erreichbarkeitsportal (online):
http://geoportal.metropolregion.hamburg.de/mrh_erreichbarkeitsanalysen/ (letzter Zugriff: 02.01.2020)

Projektbericht:
http://geoportal.metropolregion.hamburg.de/mrh_erreichbarkeitsanalysen/ (letzter Zugriff: 02.01.2020)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	20
Kartenverzeichnis	23
Tabellenverzeichnis	24
Abkürzungsverzeichnis	27
Glossar	29
1 Einführung	35
1.1 Untersuchungsanlass und Zielsetzungen	35
1.2 Erreichbarkeiten in der praktischen Anwendung	39
1.2.1 Erreichbarkeit als räumliches Interaktionspotenzial	39
1.2.2 Der Umgang mit Erreichbarkeiten in der Planungspraxis	44
1.2.3 Die Erreichbarkeitsanalyse als Planungsinstrument	46
1.2.4 Die Besonderheiten regionaler und kleinräumiger Erreichbarkeitsmodelle	56
1.2.5 Die Bedeutung multimodaler Erreichbarkeitsmodelle	59
1.3 Erreichbarkeitsinstrumente und ihre Integration in die Planungspraxis	64
1.3.1 Praxisintegration und implementation gap	64
1.3.2 Gründe für die implementation gap	66
1.3.3 Ansätze zur Überbrückung der implementation gap	70
1.4 Beispiele für regionale Erreichbarkeitsmodelle	71
1.4.1 Erreichbarkeitsanalysen als Informationswerkzeug	73
1.4.2 Erreichbarkeitsanalysen als Planungswerkzeug	77
1.5 Zwischenfazit: Erreichbarkeitsanalysen in der Planungspraxis	82
1.6 Zielkonflikte beim Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen	85

1.7	Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit	89
1.7.1	Forschungsfrage 1: Aufbau eines regionalen Erreichbarkeitsmodells	90
1.7.2	Forschungsfrage 2: Erreichbarkeitsanalysen in der Planungspraxis	93
1.7.3	Forschungsfrage 3: Die räumliche Auflösung von Erreichbarkeitsmodellen	96
1.7.4	Aufbau der Forschungsarbeit	102
2	Die Grundlagen regionaler Erreichbarkeitsmodelle	107
2.1	Erreichbarkeitsmessung in regionalen Modellen	107
2.1.1	Zur Historie der Erreichbarkeitsmessung	108
2.1.2	Die Relevanz von Erreichbarkeitsindikatoren in regionalen Modellen	112
2.1.3	Kategorien von Erreichbarkeitsindikatoren	115
2.1.3.1	Einfache und infrastrukturbasierte Erreichbarkeitsindikatoren	115
2.1.3.2	Komplexe und standortbasierte Erreichbarkeitsindikatoren	118
2.1.3.3	Personenbasierte Erreichbarkeitsindikatoren	127
2.1.4	Zwischenfazit: Erreichbarkeitsindikatoren in regionalen Modellen	132
2.2	Raumbezugssysteme	132
2.2.1	Die Bedeutung der räumlichen Auflösung	133
2.2.2	Die kleinräumige Modellierung in der Planungspraxis	135
2.2.3	Genauigkeit und Aggregationsfehler	138
2.2.3.1	Die räumliche Aggregation in Erreichbarkeitsmodellen	139
2.2.3.2	Klassifizierung von Aggregationsfehlern	140
2.2.3.3	Bedeutung von Aggregationsfehlern in Erreichbarkeitsmodellen	143
2.2.3.4	Der Umgang mit Aggregationsfehlern	151

2.2.4	Rechenzeit und Speicherbedarf	156
2.2.5	Datenverfügbarkeit und Datenaufbereitung	159
2.2.6	Zwischenfazit: Die räumliche Auflösung in regionalen Modellen	164
2.3	Verkehrsrgraphen	165
2.3.1	Die Bedeutung von Verkehrsrgraphen in Erreichbarkeitsmodellen	165
2.3.2	Der ÖV in Erreichbarkeitsmodellen	170
2.3.3	Aufbau und Einsatz von Verkehrsrgraphen des ÖV	174
2.3.3.1	Aufbau der Literaturanalyse	174
2.3.3.2	Gebietsgröße und räumliche Auflösung	176
2.3.3.3	Detaillierung von Wegen	177
2.3.3.4	Fahrplandaten und Softwareeinsatz	187
2.3.3.5	Berechnete Erreichbarkeitsindikatoren	193
2.3.4	Zwischenfazit: Die Detaillierung von ÖV-Verkehrsrgraphen	195
3	Aufbau eines regionalen Erreichbarkeitsmodells	197
3.1	Anforderungen an ein regionales Erreichbarkeitsmodell	198
3.2	Vorstellung des Untersuchungsgebietes	199
3.3	Modellaufbau und technische Umsetzung	205
3.4	Aufbau der Raumbezugssysteme und der Strukturdatenbasis	208
3.4.1	Raumbezugssysteme und Raumeinheiten	208
3.4.2	Strukturdatenbasis, Gelegenheitstypen und Einrichtungen	213
3.5	Aufbau der Verkehrsrgraphen	226
3.5.1	Öffentlicher Personenverkehr	227
3.5.2	Motorisierter Individualverkehr	240
3.5.3	Fuß- und Radverkehr	246
3.6	Komplexe Erreichbarkeitsindikatoren	250

3.7 Einordnung der Ergebnisse und Möglichkeiten der Anwendung	263
4 Erreichbarkeitsanalysen in der Nahverkehrsplanung	269
4.1 Nahverkehrspläne und regionale Erreichbarkeitsmodelle	269
4.1.1 Die Funktion von Nahverkehrsplänen im Erreichbarkeitskontext	270
4.1.2 Potenzieller Beitrag von Erreichbarkeitsindikatoren	275
4.2 Erreichbarkeitsinstrumente in Nahverkehrsplänen	276
4.2.1 Bestimmung der Untersuchungskriterien	276
4.2.2 Auswahl der Nahverkehrspläne	283
4.3 Untersuchungsergebnisse	287
4.3.1 Angebotsqualitäten und Erreichbarkeit	287
4.3.2 Räumliche Auflösung	293
4.3.3 Modellierungsansatz	298
4.4 Schlussfolgerungen	303
5 Die räumliche Auflösung von Erreichbarkeitsmodellen	309
5.1 Eine Methode zur Bestimmung von Aggregationsfehlern	310
5.1.1 Der Variationskoeffizient als Streuungsmaß	311
5.1.2 MRE – Die mittlere Referenzerreichbarkeit	316
5.1.3 Vorstellung der eingesetzten Messverfahren	318
5.1.4 Analysen mit dem Erreichbarkeitsmodell der MRH	326
5.2 Vektor- und Rastermodelle	332
5.2.1 Aggregationsfehler und die räumliche Auflösung	332
5.2.2 Geometrische und einwohnergewichtete Zentroide	342
5.2.3 Einordnung der Ergebnisse	348
5.3 Multimodale Verkehrsgraphen	353
5.3.1 Die Haltestellenanbindung im ÖV	354
5.3.2 Distanzberechnung im Fuß- und Radverkehr	358
5.3.3 Parkbezogene Reisezeiten im MIV	361
5.3.4 Bedeutung der Widerstandsberechnung	362
5.3.5 Einordnung der Ergebnisse	379

5.4 Erreichbarkeitsindikatoren und Gelegenheitstypen	380
5.5 Schlussfolgerungen zur räumlichen Auflösung	391
5.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	392
5.5.2 Empfehlungen für den Aufbau regionaler Erreichbarkeitsmodelle	401
6 Schluss	405
6.1 Kurzbeantwortung der Forschungsfragen	405
6.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse	408
6.3 Kritische Einordnung der genutzten Methode	411
6.4 Ausblick	412
6.4.1 Weiterer Forschungsbedarf	412
6.4.2 Offene Fragen in der Planungspraxis	416
7 Literaturverzeichnis	419
8 Anhang	459

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Erreichbarkeit, Mobilität und Verkehr	41
Abbildung 2:	Phasen einer Erreichbarkeitsanalyse	48
Abbildung 3:	Beispiele für die Darstellung von Erreichbarkeit	55
Abbildung 4:	Raumwiderstände und Widerstandsparameter der Verkehrsmodi	61
Abbildung 5:	Zielkonflikt zwischen Nutzbarkeit und Genauigkeit von Erreichbarkeitsmodellen	86
Abbildung 6:	Funktionsweise des Zentroidproblems	98
Abbildung 7:	Quantifizierung von Aggregationsfehlern in Erreichbarkeitsmodellen	101
Abbildung 8:	Aufbau der Arbeit	105
Abbildung 9:	Dimensionen der Erreichbarkeit	110
Abbildung 10:	Unterschiedliche Kumulations- und Potenzialindikatoren	124
Abbildung 11:	STP für den Wohnstandort und entlang eines Pendelweges	131
Abbildung 12:	Hierarchisierung von Raumeinteilungen	139
Abbildung 13:	Wirkungsweise des Skaleneffektes	141
Abbildung 14:	Wirkungsweise des Zoneneffektes	142
Abbildung 15:	Fehler A der räumlichen Aggregation	144
Abbildung 16:	Der Skaleneffekt und das Zentroidproblem	145
Abbildung 17:	Funktionsweise des Eigenpotenzialproblems	149
Abbildung 18:	Funktionsweise des Grenzproblems	150
Abbildung 19:	Einfluss von Zonen- und Skaleneffekten auf räumliche Phänomene	152
Abbildung 20:	Einwohnergewichtung von Rasterzellen	154
Abbildung 21:	Raumeinheiten, Indikatoren und Anzahl der Verbindungen	158
Abbildung 22:	Datenqualitäten und Datenfehler	163
Abbildung 23:	Ansätze zur Modellierung von IV- und ÖV-Graphen	169
Abbildung 24:	Schnellste Wege auf einem intermodalen ÖV-Verkehrsgraphen	173
Abbildung 25:	Bestandteile und Aufbau eines Erreichbarkeitsmodells	206

Abbildung 26: Technischer Aufbau des Erreichbarkeitsmodells	207
Abbildung 27: Distanzen im Rastermodell	213
Abbildung 28: Raumwiderstände auf Wegen im öffentlichen Verkehr	231
Abbildung 29: Ansätze zur Modellierung der Startwartezeit	239
Abbildung 30: Geschwindigkeiten auf dem Fahrrad in Abhängigkeit von der Steigung	250
Abbildung 31: Aufbau des Reiseaufwandsindikators (minimale Reisezeit)	252
Abbildung 32: Aufbau des Kumulationsindikators	256
Abbildung 33: Funktionsweise des Potenzialindikators	260
Abbildung 34: Untersuchungsdesign zum Vergleich von Nahverkehrsplänen	280
Abbildung 35: Quantifizierung von Aggregationsfehlern in Erreichbarkeitsmodellen	311
Abbildung 36: Die Streuung von Einzelwerten gegenüber dem mittleren Referenzwert	312
Abbildung 37: Der Variationskoeffizient und die interne Homogenität	315
Abbildung 38: Mittlere Referenzerreichbarkeit und berechnete Erreichbarkeiten	317
Abbildung 39: Variationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Erreichbarkeit im 500-Meter-Raster	321
Abbildung 40: Unterschiedliche Repräsentationsebenen und VarK	322
Abbildung 41: Einfluss der Einwohnergewichtung auf die einzelnen VarK	323
Abbildung 42: eVarK im 500-Meter-Raster nach Verkehrsmodi und Dichte der Gelegenheiten	333
Abbildung 43: RelVarK im 500-Meter-Raster nach Verkehrsmodi und Dichte der Gelegenheiten	335
Abbildung 44: RelVarK im 500-Meter-Raster nach Verkehrsmodi und Dichte der Gelegenheiten	336
Abbildung 45: VarK nach Anzahl der Raumeinheiten und Einwohner	339
Abbildung 46: EWeVarK im 500-Meter-Raster nach Verkehrsmodi und Dichte der Gelegenheiten	341

Abbildung 47: RelVarK mit geometrischen und gewichteten Zentroiden	343
Abbildung 48: EWRelVarK mit geometrischen und gewichteten Zentroiden im ÖV	345
Abbildung 49: Gewichtung von Zentroiden	346
Abbildung 50: Untersuchungsfälle der Haltestellenanbindung im ÖV	355
Abbildung 51: RelVarK im ÖV in Abhängigkeit vom Modellierungsansatz	356
Abbildung 52: RelVarK im MIV in Abhängigkeit vom Umgang mit PRZ	363
Abbildung 53: Aggregationsfehler im Individualverkehr	365
Abbildung 54: EWRelVarK im MIV, Fuß- und Radverkehr für die Reisezeit und die Reiseweite	367
Abbildung 55: RelVarK der Reisezeit und Reiseweite in Abhängigkeit vom Widerstandsattribut	369
Abbildung 56: Veränderung von RelVarK nach der Rundung von Erreichbarkeitswerten	371
Abbildung 57: Veränderung von RelVarK nach Klassifizierung der Erreichbarkeitswerte	373
Abbildung 58: RelVarK in Abhängigkeit vom Gelegenheitstyp	381
Abbildung 59: Durchschnittliche Reisezeit zur nächsten Gelegenheit	384
Abbildung 60: eVarK für Kumulationsindikatoren im ÖV und MIV	386
Abbildung 61: RelVarK nach Zeitbudget und Gewichtungsfaktor	388
Abbildung 62: Gewichtung von Zentroiden und RelVarK im 500-Meter-Raster	389
Abbildung 63: Aggregation und Disaggregation von Erreichbarkeitswerten	402

Kartenverzeichnis

Karte 1:	Räumliche Gliederung der MRH	200
Karte 2:	Bevölkerungsverteilung und zentrale Orte in der MRH	201
Karte 3:	Hauptverkehrsnetz in der Metropolregion Hamburg	202
Karte 4:	Raumbezugssysteme am Beispiel von Lüneburg	210
Karte 5:	Einwohnerverteilung auf Ebene des 100-Meter-Rasters in Lüneburg	212
Karte 6:	Bildungseinrichtungen (Auswahl) in der Metropolregion Hamburg	218
Karte 7:	Gesundheits- und Versorgungseinrichtungen (Auswahl) in Buxtehude	221
Karte 8:	Freizeitgelegenheiten (Auswahl) in Bad Segeberg	224
Karte 9:	Fahrplandaten und Datenquellen	229
Karte 10:	Detaillierung des ÖV-Verkehrsgraphen am Beispiel vom Lübeck	230
Karte 11:	Reisezeitvergleich zwischen der t_0 und der t_{Akt} in der MRH	244
Karte 12:	Detaillierung des NMIV-Verkehrsgraphen am Beispiel von Elmshorn	248
Karte 13:	Reisezeit im MIV zum nächsten Oberzentrum in der MRH	255
Karte 14:	Ohne Umstieg erreichbare Arbeitsplätze	258
Karte 15:	Im MIV erreichbare Arbeitsplätze bei einer negativ exponentiellen Gewichtung	261
Karte 16:	eVarK des ÖV und im Gelegenheitstyp Hausarzt	328
Karte 17:	RelVarK des ÖV für geometrische Zentroide im Gelegenheitstyp Hausarzt	329
Karte 18:	Veränderung des RelVarK nach Klassifizierung der Reisezeit zum nächsten Hausarzt im Radverkehr	377

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher Modellansätze	51
Tabelle 2: Ausgewählte Anwendungsbereiche standortbezogener Erreichbarkeiten	54
Tabelle 3: Anforderungen des IV und ÖV an Erreichbarkeitsmodelle	63
Tabelle 4: Beispiele für Erreichbarkeitsanalysen als Informationswerkzeug	72
Tabelle 5: Detaillierungsstufen der Verkehrsgraphen	102
Tabelle 6: Raumeinheiten und räumliche Auflösung am Beispiel Hamburgs	157
Tabelle 7: Gebietseinteilungen und Menge der Raumeinheiten	177
Tabelle 8: Modellansätze bei der Detaillierung von Wegen	178
Tabelle 9: Modellierung intermodaler Wege nach Anzahl der Raumeinheiten	181
Tabelle 10: Bestimmung eigenständiger Verbindungen	187
Tabelle 11: Software zur Berechnung von Raumwiderständen im ÖV	190
Tabelle 12: Verwendete Erreichbarkeitsindikatoren nach Menge der Raumeinheiten	194
Tabelle 13: Die Raumbezugssysteme des Erreichbarkeitsmodells	209
Tabelle 14: Strukturdatenbasis des Erreichbarkeitsmodells	214
Tabelle 15: Elemente des ÖV-Verkehrsgraphen	227
Tabelle 16: Parameter für die Widerstandsberechnung im ÖV	232
Tabelle 17: Ansätze zur Modellierung des Haltestellenzugangs	235
Tabelle 18: Ansätze zur Modellierung der Startwartezeit	237
Tabelle 19: Parkbezogene Reisezeiten nach Gebietstyp (FGSV-RIN)	245
Tabelle 20: Geschwindigkeiten für ausgewählte Streckentypen im Fuß- und Radverkehr	249
Tabelle 21: Abgrenzung der verwendeten Erreichbarkeitsindikatoren	251
Tabelle 22: Parameter der verwendeten Kumulationsindikatoren	257
Tabelle 23: Parameter der verwendeten Potenzialindikatoren	263

Tabelle 24: Angebotsqualitäten und Erreichbarkeitsindikatoren im ÖPNV	278
Tabelle 25: Vergleichene Modellierungsansätze	283
Tabelle 26: Sampling der untersuchten Nahverkehrspläne	284
Tabelle 27: Häufigkeit des Umgangs mit Angebotsqualitäten	287
Tabelle 28: Häufigkeit der Bewertung von Angebotsqualitäten	291
Tabelle 29: Häufigkeit des adressierten Raumbezugsystems bei der Festlegung von Standards	294
Tabelle 30: Häufigkeit des räumlichen Bezugssystems bei der Bewertung	295
Tabelle 31: Häufigkeit des Modellierungsansatzes bei der Festlegung von Standards	299
Tabelle 32: Verwendete Modellierungsansätze bei der Erreichbarkeitsberechnung	301
Tabelle 33: Aggregationsfehler und Modellparameter	310
Tabelle 34: Mittlere VarK in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus und dem Vergleichssystem	330
Tabelle 35: Mittlere VarK nach Verkehrsmodus und Vergleichssystem	337
Tabelle 36: VarK über alle Gelegenheitstypen für geometrische und gewichtete Zentroide	344
Tabelle 37: Anteil der Reisezeiten, die oberhalb der Referenzwerte liegen (geom. Zentroide)	349
Tabelle 38: Anteil der Reisezeiten, die oberhalb der Referenzwerte liegen (gew. Zentroide)	351
Tabelle 39: Anteil der Fehlzuweisungen von Gelegenheiten bei geometrischen und gewichteten Zentroiden	352
Tabelle 40: RelVarK im ÖV in Abhängigkeit vom Modellierungsansatz	356
Tabelle 41: RelVarK im NMIV in Abhängigkeit vom Modellierungsansatz	359
Tabelle 42: Umwegfaktoren nach Gelegenheitstyp	360
Tabelle 43: Veränderung des RelVarK der Reiseweite gegenüber dem RelVarK der Reisezeit	368

Tabelle 44: Veränderung des RelVarK nach der Rundung von Erreichbarkeitswerten	372
Tabelle 45: Veränderung des RelVarK nach der Klassifizierung von Erreichbarkeitswerten	375
Tabelle 46: Ladung der Erreichbarkeitsklassen im Gelegenheitstyp Hausarzt im 500-Meter-Raster	376
Tabelle 47: Dichte und Erreichbarkeit der einzelnen Gelegenheitstypen	382
Tabelle 48: Aggregation von Standorten in ein 500-Meter-Raster	385
Tabelle 49: Raumbezugssysteme bei Reiseaufwandsindikatoren der Reisezeit	393
Tabelle 50: Raumbezugssysteme im MIV in Relation zur Fläche und zur Einwohnerzahl	394
Tabelle 51: Raumbezugssysteme im ÖV nach Detaillierungsstufen	395
Tabelle 52: Raumbezugssysteme im MIV nach Detaillierungsstufen	396
Tabelle 53: Raumbezugssysteme bei Reiseaufwandsindikatoren der Reisezeit und gewichteten Zentroiden	396
Tabelle 54: Raumbezugssysteme bei Kumulations- und Potenzialindikatoren	397
Tabelle 55: Raumbezugssysteme bei Aggregation von Reiseaufwandsindikatoren	399
Tabelle 56: Empfohlene Raumbezugssysteme bei klassifizierten Reiseaufwandsindikatoren	400
Tabelle 57: Übersicht regionaler Erreichbarkeitsmodelle in Wissenschaft und Praxis	461

Abkürzungsverzeichnis

ALKIS	Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem
ATKIS	Amtliches topographisch-kartographisches Informationssystem
API	Application Programming Interface
AST	Anruf-Sammel-Taxi
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMVIT	Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (Österreich)
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
COST	European Cooperation in Science and Technology
Destatis	Statistisches Bundesamt
DVAN	Daseinsvorsorgeatlas Niedersachsen
ESPON	European Spatial Planning Observation Network
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
GIS	Geoinformationssystem
GTFS	General Transit Feed Specification
HAFAS	HaCon Fahrplan-Auskunfts-System
HDF	Hierarchical Data Format
HVV	Hamburger Verkehrsverbund GmbH
HVZ	Hauptverkehrszeit
ILVP M-V	Integrierter Landesverkehrsplan (Mecklenburg-Vorpommern)
LGV	Landesbetrieb für Geoinformation und Vermessung (MRH)
LNVP	Landesweiter Nahverkehrsplan (Schleswig-Holstein)
LTP	Local transport plan (England)
LUTI	Land use-transport interaction
MAUP	Modifiable Areal Unit Problem
MiD	Mobilität in Deutschland (Verkehrserhebung)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MKRO	Ministerkonferenz für Raumordnung
MORO	Modellvorhaben der Raumordnung
MPO	Metropolitan planning organisations

MRE	Mittlere Referenzerreichbarkeit
MRH	Metropolregion Hamburg
NA	Network Analyst (ArcGIS®)
NMIV	Nichtmotorisierter Individualverkehr
NVP	Nahverkehrsplan
NVZ	Nebenverkehrszeit
ÖIR	Österreichischen Institut für Raumplanung
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖROK	Österreichische Raumordnungskonferenz
OSM	OpenStreetMap
ÖSPV	Öffentlicher Straßenpersonennahverkehr
OTP	OpenTripPlanner
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PBefG	Personenbeförderungsgesetz
Pkw	Personenkraftwagen
PLZ	Postleitzahl
PRZ	Parkbezogene Reisezeit
PSS	Planning support systems
RROP	Regionales Raumordnungsprogramm
RTP	Regional transportation plan
RegG	Regionalisierungsgesetz
SIP	Social interaction potential
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
SQL	Structured Query Language
SrV	System repräsentativer Verkehrsverhaltensbefragungen/ Mobilität in Städten (Verkehrserhebung)
STP	Space-time prism (Raum-Zeit Prismen)
SVB	Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte
SWZ	Startwartezeit
TUHH	Technische Universität Hamburg
VarK	Variationskoeffizient
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V.
VNO	Verkehrsgesellschaft Nord-Ost-Niedersachsen mbH

Glossar

Daseinsvorsorge

Daseinsvorsorge ist die »flächendeckende Versorgung mit bestimmten, von den politisch Verantwortlichen subjektiv als lebensnotwendig eingestufteten Gütern und Dienstleistungen zu allgemein tragbaren (sozial verträglichen) Preisen« (Knorr 2005, S. 35). Zu diesen gehören Leistungen der Grundversorgung und der Bildung, der allgemeine Zugang zu öffentlichen und kulturellen Einrichtungen sowie die Bereitstellung öffentlicher Verkehrsangebote (Winkel et al. 2007, S. 1). Die Erreichbarkeit von Versorgungseinrichtungen ist eine Schlüsseldimension bei der Sicherung der Daseinsvorsorge (BMVI 2017, S. 12).

Erreichbarkeit

Erreichbarkeit ist der an einem Standort erforderliche Aufwand, um Gelegenheiten mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln und zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erreichen. Diese Definition geht zurück auf die *integral accessibility*, welche die Raumwiderstände zwischen einem Standort und allen Gelegenheiten in einem Untersuchungsgebiet bewertet (Ingram 1971, S. 102). Das eingeführte Begriffsverständnis entspricht der standortbezogenen Erreichbarkeit, also der Lagegunst eines Standortes gegenüber seiner Umgebung (Dalvi & Martin 1976, S. 18; Geurs & van Wee 2004, S. 129).

Erreichbarkeitsanalyse

Eine Erreichbarkeitsanalyse ist die Berechnung, Aufbereitung, Darstellung und Interpretation von Erreichbarkeitsindikatoren (*Erreichbarkeitsindikator*) in einem abgegrenzten Untersuchungsgebiet. Erreichbarkeitsanalysen erfordern den Aufbau und die Pflege von Erreichbarkeitsmodellen (*Erreichbarkeitsmodell*).

Erreichbarkeitsinstrument

Im internationalen Kontext ist häufig von *accessibility instruments* bzw. Erreichbarkeitsinstrumenten die Rede (Hull et al. 2012; te Brömmelstroet et al. 2014). Erreichbarkeitsinstrumente umfassen ein Erreichbarkeitsmodell (*Erreichbarkeitsmodell*) und unterschiedliche auf einen konkreten

Anwendungsfall zielende Erreichbarkeitsindikatoren (Papa *et al.* 2016, S. 57). Erreichbarkeitsmodelle und Erreichbarkeitsindikatoren bilden in diesem Sinne eine funktionale Einheit.

Erreichbarkeitsindikator

Erreichbarkeitsindikatoren werden verwendet, um Erreichbarkeit (*Erreichbarkeit*) im Sinne eines bestimmten Begriffsverständnisses zu quantifizieren. Es werden einzelne Messgrößen (z. B. *Reisezeit zum nächsten Oberzentrum*) sowie Gruppen typgleicher Messgrößen (z. B. *Potenzialindikatoren*) unter dem Begriff des Erreichbarkeitsindikators zusammengefasst.

Erreichbarkeitsmodell

Ein Erreichbarkeitsmodell beinhaltet Verkehrsgraphen (*Verkehrsgraph*), Gelegenheiten, Raumbezugssysteme, Routingalgorithmen und Routinen zur Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren (*Erreichbarkeitsindikator*).

Gelegenheit

Gelegenheiten sind Orte an denen Aktivitäten durchgeführt werden können. Diese Aktivitäten dienen einer konkreten Bedürfnisbefriedigung. Beispielsweise wird die Versorgung in Supermärkten, Kaufhäusern oder Baumärkten sichergestellt. Alle Gelegenheiten sind mindestens einem Raumbezugssystem zugeordnet (*Raumbezugssystem*).

Intermodalität

Intermodalität bezeichnet die Nutzung von verschiedenen Verkehrsmodi (*Verkehrsmodus*) auf den einzelnen Etappen (*Etappe*) eines Weges (FGSV 2017, S. 7). Werden keine vereinfachten Annahmen getroffen (z. B. *Luftlinie zu den Haltestellen*), müssen Wege im öffentlichen Verkehr (ÖV) immer als intermodale Wege modelliert werden.

Isochrone

Mit Isochronen werden Linien und Gebiete bezeichnet, die ausgehend von einem oder mehreren Standorten innerhalb einer identischen maximalen Reisezeit erreicht werden (O'Sullivan *et al.* 2000, S. 85).

Kleinräumigkeit

Kleinräumigkeit (adj. kleinräumig) bezeichnet die Verwendung einer hohen räumlichen Auflösung in Erreichbarkeitsmodellen. Dazu gehört üblicherweise eine »Raumeinteilung deutlich unterhalb des Gemeindevonwerts« (BMVBS 2010c, S. 42). In diesem Sinne beinhalten kleinräumige Erreichbarkeitsmodelle ein zumeist auf Raster- oder Gebäudeebene aufgelöstes Raumbezugssystem (*Raumbezugssystem*).

Multimodalität

In Erreichbarkeitsmodellen wird Multimodalität allein über die Angebotsseite definiert. Demnach bezeichnet sie einen (oder mehrere) Verkehrsgraphen (*Verkehrsgraph*), der die Berechnung von Raumwiderständen für mehrere Verkehrsmodi (*Verkehrsmodus*) ermöglicht (FGSV 2017, S. 5).

Raumbezugssystem und Raumeinheiten

Erreichbarkeitsindikatoren werden für Raumeinheiten in einem Untersuchungsgebiet berechnet. Alle Raumeinheiten sind einem Raumbezugssystem zugeordnet. Jedes Raumbezugssystem umfasst ausschließlich Raumeinheiten der gleichen Maßstabsebene. Beispielsweise besteht das Raumbezugssystem »500-Meter-Raster« nur aus symmetrischen Rasterzellen mit einer Kantenlänge von 500 Metern.

Raumwiderstand

Unter dem Sammelbegriff des Raumwiderstandes werden alle Kosten (Hesse et al. 2012, S. 7) oder hinderlichen Eigenschaften (Ammoser & Hoppe 2006, S. 16) des Raumes zwischen zwei Punkten oder zwei Verkehrsknoten zusammengefasst. In Erreichbarkeitsmodellen werden in der Regel Reisezeiten, Reiseweiten, Reisekosten, die Umsteigehäufigkeit (nur ÖV) und die Bedienfrequenz (nur ÖV) als maßgebliche Raumwiderstände berücksichtigt.

Regionale Ebene und regionales Modell

Mit der regionalen Ebene wird in dieser Arbeit ein Gebiet adressiert, welches mehrere Landkreise umfasst und somit auch erweiterte Stadt-Umland-Regionen oder Metropolregionen enthält. Diese Definition schließt auch ganze Bundesländer oder Landesgrenzen überschreitende Gebietszuschnitte ein. Die Erreichbarkeitsberechnung in einem solchen Gebiet erfolgt mit Hilfe eines regionalen Modells.

Verkehrsgraph

Ein Verkehrsgraph ist die modellhafte Abbildung des Verkehrsnetzes und des Verkehrsangebotes über topologisch verknüpfte und individuell gewichtete Kanten und Knoten (Schwarze 2015, S. 150). Zu den Verkehrsnetzen gehören Straßen, Gehwege und Haltestellen. Das Verkehrsangebot wird über die Fahrplandaten des öffentlichen Verkehrs repräsentiert.

Verkehrsmodell

Ein Verkehrsmodell ist die modellhafte Abbildung der Raumstruktur, des Verkehrsangebotes, der Bevölkerungsverteilung und individueller Verhaltensparameter. Mit Hilfe dieser Modelle ist es möglich, die Verkehrsnachfrage im Untersuchungsgebiet nachzubilden und in Abhängigkeit von Systemänderungen zu prognostizieren. Zur Nachfrageberechnung werden in der Regel die Verkehrserzeugung (Erzeugung von Wegen), die Verkehrsverteilung (Zielwahl), die Verkehrsaufteilung (Moduswahl) und die Verkehrsumlegung (Routenwahl) sukzessive und rückkoppelnd durchlaufen (FGSV 2013, S. 33).

Verkehrsmodus und Verkehrsmittel

Als Verkehrsmodus wird *»eine Gruppe von Verkehrsmitteln mit ähnlichen Eigenschaften sowie der Fußverkehr bezeichnet«* (FGSV 2017, S. 3). Im Personenverkehr sind dies der Fuß- und Radverkehr, der motorisierte Individualverkehr (MIV) sowie der ÖV. In der Erreichbarkeitsmodellierung ist die Unterscheidung zwischen dem NMIV (nichtmotorisierter Individualverkehr), dem MIV und dem ÖV üblich, da sie jeweils einen anderen Modellierungsansatz erfordern (vgl. auch Kapitel 3). Verkehrsmittel sind die für Ortsveränderungen von Personen genutzten und jeweils einem Modus zugeordneten Fahrzeuge. Der Fußverkehr ist kein Verkehrsmittel, sondern ausschließlich ein Verkehrsmodus (ebd., S. 3).

Wegekette, Weg und Etappe

Die Abfolge mehrerer Ortsveränderungen zur Durchführung von Aktivitäten an unterschiedlichen Orten wird als Aktivitäten- oder Wegekette bezeichnet (Ahrens et al. 2014, S. 13). Ein typisches Beispiel ist die Wegekette »Wohnen->Arbeit->Einkauf->Wohnen« die zeitgleich einen Ausgang darstellt, da sie am Wohnstandort beginnt und endet (ebd., S. 13). Ein Weg ist jede »Ortsveränderung einer Person von einem Ausgangspunkt zu einem Ziel« (FGSV 2012, S. 25).

Jeder einzelne Weg kann sich wiederum in unterschiedliche Etappen oder Teilwege untergliedern. Ein Verkehrsmittelwechsel erzeugt mehrere Etappen (infas & DLR 2010, S. 17). Nach Ahrens et al. (2014, S. 11) werden auch die fußläufigen Zu- und Abgänge des ÖV als eigenständige Etappen deklariert.

1 Einführung

1.1 Untersuchungsanlass und Zielsetzungen

Unter dem Begriff der Erreichbarkeit (vgl. Glossar) werden unterschiedliche Konzepte zusammengefasst, die eine integrierte Perspektive auf die Landnutzung, das Verkehrssystem und individuelle Bedürfnisse und Fähigkeiten eröffnen (Geurs & van Wee 2004, S. 129). Räumliche Interaktionen bilden das Bindeglied zwischen den einzelnen Komponenten. Für die Befriedigung zahlreicher Bedürfnisse außerhalb der eigenen Wohnung ist es für die Bevölkerung unabdingbar, Wege (vgl. Glossar) im Verkehrssystem zurückzulegen und verschiedene Gelegenheitsorte aufzusuchen. Umfang und Durchführung dieser Wege hängen jedoch maßgeblich von den Raumwiderständen (vgl. Glossar) zwischen den einzelnen Gelegenheiten ab (vgl. Glossar). Mit Erreichbarkeitsmodellen (vgl. Glossar) können diese Raumwiderstände zwischen Gelegenheitsorten in Abhängigkeit vom Verkehrssystem ermittelt werden. Sie ermöglichen es außerdem, diese räumlich zu verorten und somit in Relation zu soziodemographischen und sozioökonomischen Merkmalen der Bevölkerung zu setzen. Erreichbarkeitsmodelle sind also in der Lage, die Landnutzung, das Verkehrssystem und individuelle Bevölkerungsmerkmale zu verbinden. Raumwiderstände sind das verbindende Element und Potenziale zur räumlichen Interaktion das zentrale Ergebnis.

Es ist nicht überraschend, dass die Möglichkeit zur räumlichen Interaktion einen wesentlichen Bestandteil der öffentlich Raum- und Verkehrsplanung darstellt. Erreichbarkeitsanalysen (vgl. Glossar) greifen auf räumliche Analysen genauso zurück, wie Verkehrsmodelle (vgl. Glossar) und einfache Standortanalysen. Da Erreichbarkeiten primär über die reine Darstellung von Raumwiderständen formalisiert werden, sind sie ein essentieller Bestandteil unterschiedlicher räumlicher Planungsinstrumente (vgl. Abschnitt 2.1.3). Dies erklärt außerdem ihre wachsende Bedeutung in unterschiedlichen Forschungsfeldern. Zu diesen gehören die Daseinsvorsorge (vgl. Glossar), die soziale Exklusion und die Entwicklung von Immobilien- und Bodenpreisen (BBSR 2015; Dubé *et al.* 2013; Social Exclusion Unit 2003).

Bei der Verortung räumlicher Interaktionspotenziale ist zu klären, welche Raumwiderstände, Verkehrsmodi (vgl. Glossar) und Raumbezugsysteme (vgl. Glossar) berücksichtigt werden sollen. Dies hängt ganz entscheidend von der Fragestellung und der Größe des Untersuchungsgebietes ab. In der öffentlichen Planung gehören die Sicherung der Daseinsvorsorge, der Umstieg auf umweltschonende Verkehrsmittel (vgl. Glossar) sowie die Gewährleistung von Mobilität zu den zentralen Herausforderungen. Die entscheidenden Handlungsfelder sind u. a. die Regional- und Landesplanung, die Verkehrsentwicklungsplanung und die ÖPNV-Planung (Öffentlicher Personennahverkehr). Dabei handelt es sich jedoch zumeist um hoheitliche Aufgaben in Verantwortung der Landkreise oder Bundesländer. In der Planungspraxis müssen Raumwiderstände also zumeist in einem regionalen Untersuchungskontext mit Hilfe von Erreichbarkeitsmodellen ermittelt werden. Die regionale Ebene (vgl. Glossar) ist innerhalb des Mehrebenensystems in Deutschland nicht klar abgegrenzt. Mitunter wird mit ihr die Landesebene adressiert (Boeckh *et al.* 2015, S. 54), an anderer Stelle aber auch ein Zusammenschluss unterschiedlicher räumlicher und organisatorischer Einheiten auf dem Gebiet der regionalen Planung zwischen der Landes- und der Kommunalebene (Hülsmann & König 2017). In dieser Arbeit wird mit der regionalen Ebene ein Gebietszuschnitt bezeichnet, der mehrere Landkreise und damit beispielsweise auch erweiterte Stadt-Umland-Regionen oder Metropolregionen umfasst.

Erreichbarkeitsmodelle machen Raumwiderstände zwischen den einzelnen Funktionen der Landnutzung sichtbar und setzen diese in Relation zum Verkehrssystem. Da der Umstieg auf öffentliche und umweltschonende Verkehrsmittel ein übergeordnetes Planungsziel darstellt, die Sicherung der Daseinsvorsorge aber nicht ohne den motorisierten Individualverkehr (MIV) zu leisten ist, müssen multimodale Erreichbarkeitsmodelle aufgebaut werden. Die berechneten Raumwiderstände sollen für die gesamte Bevölkerung verallgemeinerbar sein und sind daher für hochaufgelöste Gebietseinheiten zu berechnen. In diesem Zusammenhang hat sich ein Modellansatz zur Berechnung der Raumwiderstände von Tür-zu-Tür etabliert. Dieser berücksichtigt standorttreue Gelegenheiten und detaillierte Wege (vgl. Abschnitt 2.3). Die Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren (vgl. Glossar) für hochaufgelöste

Raumbezugssysteme in einem regionalen Untersuchungskontext und unter Berücksichtigung detaillierter Wege stellt die Modellentwickler und -anwender vor große Herausforderungen. Zu diesen gehören eine aufwendige Datenbereitstellung und -validierung, lange Rechenzeiten, komplexe und teure Computerprogramme sowie die Notwendigkeit umfangreichen Expertenwissens.

Obwohl die Bedeutung von Erreichbarkeitsinstrumenten (vgl. Glossar) nicht bestritten wird, ist ihre Integration in die Planungspraxis bisher nur unzureichend erfolgt. Unter dem Stichwort der *›implementation gap‹* wird in diesem Zusammenhang die Lücke zwischen der Entwicklung und Nutzung von Erreichbarkeitsinstrumenten diskutiert (vgl. Glossar) (te Brömmelstroet & Bertolini 2008; te Brömmelstroet *et al.* 2014; Vonk *et al.* 2005). Eine Ursache ist die eingeschränkte Nutzbarkeit (usability) von Erreichbarkeitsmodellen und Erreichbarkeitsinstrumenten im regionalen Kontext (vgl. Abschnitt 1.3). So existieren bisher nur wenige Modelle, die die multimodale Erreichbarkeitsberechnung auf kleinräumiger und regionaler Ebene ermöglichen (vgl. Abschnitt 1.4). Dies betrifft insbesondere die anspruchsvolle Integration öffentlicher Verkehrsmittel. Noch gewährleistet kein Modellansatz die Berechnung komplexer Erreichbarkeitsindikatoren in einem sehr großen Gebiet und für mehrere 100 Tsd. Raumeinheiten (vgl. Glossar) unter Berücksichtigung detaillierter und multimodaler Verkehrsgraphen (vgl. Glossar) mit kurzen Rechenzeiten (vgl. Abschnitt 2.3). Gleichzeitig ist fraglich, ob in den einzelnen Fachplanungen die Einsatzmöglichkeiten von multimodalen und kleinräumigen Erreichbarkeitsmodellen bereits vollständig erkannt werden. Bisher richtete die Forschung ihren Blick auf die Nutzbarkeit und den Nutzen (usefulness) von Erreichbarkeitsinstrumenten in Abhängigkeit u. a. von planerischen Anforderungen, Vorkenntnissen und Erreichbarkeitsindikatoren (vgl. Abschnitt 1.3). Da die Modellierung des öffentlichen Verkehrssystems einerseits eine besondere Herausforderung darstellt und andererseits umfangreiche Möglichkeiten zur Berechnung von Raumwiderständen bereithält, ist die Identifikation von Praxisanforderungen hier besonders relevant. Bisher beantwortet die Forschung aber nicht, in welcher Detaillierung die Integration öffentlicher Verkehrsmitteln erfolgen muss, um relevante planerische Schlussfolgerungen zu ziehen. Beantwortet wird ebenso wenig, welchen Beitrag detaillierte

Erreichbarkeitsmodelle liefern können, um die Analysegrundlagen in der ÖV-Planung und namentlich der Nahverkehrsplanung zu erweitern. Zwar werden immer wieder Erreichbarkeitsmodelle mit einer hohen räumlichen Auflösung gefordert, gleichzeitig besteht jedoch eine Erkenntnislücke bezüglich des konkreten Einflusses auf die Genauigkeit von Modellergebnissen (Schwarze 2015, S. 315). Bisher wurde nicht geklärt, inwiefern der Nutzen einer hohen räumlichen Auflösung mit den berücksichtigten Verkehrsmodi, der Detaillierung von Verkehrsgraphen, den berechneten Erreichbarkeitsindikatoren und den avisierten Anwendungsfeldern korrespondiert. Zumal eine hohe räumliche Auflösung den Umgang mit Erreichbarkeitsmodellen wesentlich erschwert. Adressiert wird hier das *»rigor-relevance dilemma«*, also der Widerspruch zwischen wissenschaftlicher Präzision und praktischer Relevanz (Silva 2008, S. 74; Vonk *et al.* 2005). Der Einsatz einer hohen räumlichen Auflösung ist in der Planungspraxis nur mit einer hohen Modellgüte zu rechtfertigen.

Diese Arbeit hat das Ziel, den Einfluss unterschiedlicher räumlicher Auflösungen auf die Aussagekraft von Erreichbarkeitsmodellen zu untersuchen. Zudem wird die Abhängigkeit zwischen der räumlichen Auflösung und der Detaillierung von Verkehrsgraphen analysiert. Zu beantworten ist außerdem, in welchem Umfang öffentliche Planung bereits heute auf Erreichbarkeitsanalysen zurückgreift und welche räumliche Auflösung diesen zugrunde liegt. Die Untersuchung erfolgt am Beispiel des multimodalen und kleinräumigen Erreichbarkeitsmodells der Metropolregion Hamburg (MRH). Da Raumwiderstände die zentrale Untersuchungsgröße darstellen, sind die Untersuchungsergebnisse prinzipiell auf alle Modelle übertragbar, die der Berechnung räumlicher Interaktionspotenziale dienen. Zu diesen gehören unter anderem Verkehrsmodelle, integrierte Modelle und Tourenmodelle.

In Abschnitt 1.2 wird die Rolle von Erreichbarkeit herausgearbeitet und ihre Bedeutung in der Planungspraxis diskutiert. In diesem Abschnitt werden außerdem die Erreichbarkeitsanalyse und die Besonderheiten kleinräumiger und multimodaler Erreichbarkeitsmodelle vorgestellt. Anschließend wird erörtert, welche Hemmnisse bisher dazu führen, dass Erreichbarkeitsanalysen in der praktischen Anwendung eine untergeordnete Rolle spielen und nach wie vor eine implementation gap besteht. Zu diesen Hemmnissen gehört, dass Erreichbarkeitsmodelle

mit hohen theoretischen Anforderungen entwickelt werden, die späteren Anwender jedoch andere und mitunter nicht einlösbare Erwartungen formulieren. Aus diesem Dilemma werden Anforderungen abgeleitet, die sich direkt auf den Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen beziehen (vgl. Abschnitt 1.6). Aus diesen ergeben sich unterschiedliche Fragestellungen, die über drei Forschungsfragen adressiert werden. Diese beziehen sich unmittelbar auf den Aufbau und die Anwendung von Erreichbarkeitsmodellen (vgl. Abschnitt 1.7):

1. *Wie muss ein Erreichbarkeitsmodell aufgebaut sein, um multimodale und kleinräumige Erreichbarkeiten mit einer hohen Genauigkeit abzubilden?*
2. *Welche Verfahren zur Modellierung der Erreichbarkeit mit öffentlichen Verkehrsmitteln werden in der Nahverkehrsplanung aktuell eingesetzt?*
3. *Wie beeinflusst die räumliche Auflösung die Genauigkeit von Erreichbarkeitsmodellen unter besonderer Berücksichtigung multimodaler Verkehrsgraphen?*

1.2 Erreichbarkeiten in der praktischen Anwendung

Der in dieser Arbeit verwendete Erreichbarkeitsbegriff wird im folgenden Abschnitt eingeführt und gegenüber weiteren Konzepten abgegrenzt. Darauf aufbauend wird erläutert, welche Rolle Erreichbarkeiten in der öffentlichen Planung spielen. Den Umgang mit Erreichbarkeiten ermöglichen unterschiedliche auf Erreichbarkeitsmodellen aufbauende Planungswerkzeuge. Schlussendlich geht es um die Herausforderungen, die regionale, kleinräumige und multimodale Erreichbarkeitsmodelle erzeugen.

1.2.1 Erreichbarkeit als räumliches Interaktionspotenzial

Lange wurde Erreichbarkeit ausschließlich über die Raumwiderstände zwischen in der Fläche verteilten Gelegenheiten definiert. Nach Ingram (1971, S. 101ff.) bemisst sich Erreichbarkeit über die Leichtigkeit, mit der Ziele zu erreichen sind und die sich daraus ergebende relative Lagegunst von Standorten. Dalvi & Martin (1976, S. 18) erweitern die Leichtigkeit

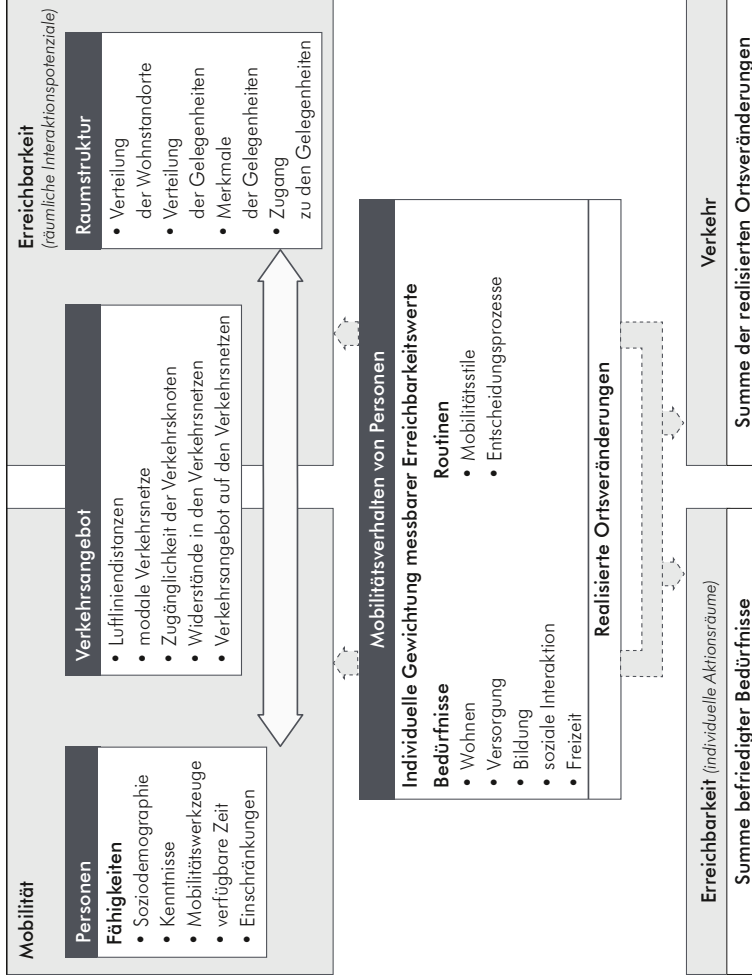
um eine individuelle Komponente. Erreichbarkeit ist demnach die Einfachheit, mit der Personen Gelegenheiten erreichen können. Es ist daher nicht möglich, Erreichbarkeit ohne die Gewichtung von Raumwiderständen und Zielen zu bewerten (Handy & Niemeier 1997, S. 1175, 1176).

In der Gegenwart hat sich ein Verständnis durchgesetzt, welches Erreichbarkeit in vier Komponenten untergliedert. Dies sind die Raumstruktur, das Verkehrsangebot, die Zeit sowie individuelle Bedürfnisse und Fähigkeiten (Geurs & van Wee 2004, S. 129). Die Raumstruktur und das Verkehrsangebot sind die zentralen Bestandteile von Erreichbarkeitsmodellen. Die zeitliche Dimension ermöglicht eine Erweiterung um Öffnungszeiten, individuelle Zeitbudgets und tageszeitabhängige Reisezeiten. Die individuelle Dimension beinhaltet den Umgang mit persönlichen Merkmalen wie Alter, Geschlecht, Einkommen und Pkw-Verfügbarkeit. Diese Multidimensionalität von Erreichbarkeit führt jedoch dazu, dass sich bisher kein einheitliches und umfassendes Begriffsverständnis durchsetzen konnte (Schwarze 2015, S. 33).

Grundsätzlich ist es möglich, Erreichbarkeit als eine objektivierte Eigenschaft von Standorten oder über die Aktions- und Möglichkeitsräume von Personen zu definieren (Curl *et al.* 2015, S. 86). Erreichbarkeit im Sinne von Standorten stellt die Raumstruktur und das Verkehrsnetz ins Zentrum der Betrachtung. Mit ihr können die Raumwiderstände, etwa die Reisezeit oder die Reiseweite, zwischen Gelegenheiten in Abhängigkeit von der Tageszeit berechnet werden (Geurs & van Wee 2004, S. 133). Typische Beispiele sind die Reisezeit zur nächsten Schule mit öffentlichen Verkehrsmitteln oder die Menge innerhalb von einer Stunde erreichbarer Arbeitsplätze. Mit standortbasierten Erreichbarkeiten ist es also möglich, die im Raum verteilten Interaktionspotenziale zu adressieren. Üblich ist außerdem die Relativierung dieser Interaktionspotenziale gegenüber der Wohnbevölkerung. Solche objektiven Erreichbarkeitsindikatoren dienen der Messung von Raumwiderständen zwischen Standorten und Gelegenheiten.

Welche Einflüsse Raumwiderstände und Interaktionspotenziale auf Personen ausüben, wird von der Wahrnehmung sowie individuellen Bedürfnissen und Fähigkeiten bestimmt (Geurs & van Wee 2004, S. 129). Ohne zusätzliche Informationen ist es nicht möglich, Raumwiderstände und die Verteilung von Personen und Gelegenheiten in räumliche

Abbildung 1: Erreichbarkeit, Mobilität und Verkehr



Quelle: eigene Darstellung

Interaktionen zu übersetzen. Es wird also versucht, Erreichbarkeit als ein auf wahrgenommene Aktions- oder Möglichkeitsräume zielendes Konzept zu etablieren. An dieser Stelle ist es sinnvoll, die Beweglichkeit von Personen und ihre »individuelle Verkehrsmöglichkeit« (Holz-Rau 2009, S. 797) als Mobilität zu bezeichnen. Als Mobilität wird gemeinhin die Möglichkeit verstanden, Ortsveränderungen durchzuführen. Diese Beweglichkeit resultiert aus »räumlichen, physischen, sozialen und virtuellen Rahmenbedingungen« (Ahrend *et al.* 2013, S. 2). Zu diesen gehören Zeit- und Kostenbudgets, Tagesabläufe, verfügbare Mobilitätswerkzeuge (Pkw, Fahrrad, ÖV-Zeitkarte etc.) und tradierte Verhaltensmuster. Wie in Abbildung 1 dargestellt, hat das Verkehrsangebot sowohl einen Einfluss auf die Erreichbarkeit im Sinne eines räumlichen Interaktionspotenzials, als auch die Mobilität als Möglichkeit zur Ortsveränderung. Die Bedürfnisbefriedigung außerhalb der eigenen Wohnung hängt davon ab, ob und wie das Verkehrsangebot von Personen genutzt werden kann. Aus dieser Überlegung ist die Forderung nach einer auf Mobilität ausgerichteten Verkehrsplanung entstanden. Dieses als »*mobility paradigm*« bezeichnete Planungsverständnis soll die Raumwiderstände reduzieren, um die Beweglichkeit von Personen und damit die Mobilität zu steigern (Banister 2008, S. 74; Proffitt *et al.* 2019, S. 168). Gleichzeitig soll die Realisierung von Mobilität jedoch möglichst wenig Verkehr verursachen (Deffner 2011, S. 374).

Zunehmend wird jedoch gefordert, dass nicht die hohe Beweglichkeit von Personen oder der geringe Raumwiderstand zwischen Gelegenheiten die höchsten verkehrsplanerischen Ziele darstellen sollten, sondern die Befriedigung von Bedürfnissen außerhalb der eigenen Wohnung (Banister 2008; Proffitt *et al.* 2019, S. 168). Cervero (1997) spricht in diesem Zusammenhang von einem Paradigmenwechsel zum »*accessibility planning*«. Demnach wird Erreichbarkeit über individuelle Aktionsräume definiert (ebd., S. 10). Diese sollten die Befriedigung aller Bedürfnisse ermöglichen, gleichzeitig aber möglichst wenig Verkehr verursachen. Individuelle Aktionsräume resultieren jedoch auch aus dem Mobilitätsverhalten von Personen. Dieses beeinflusst die Gewichtung von Interaktionspotenzialen an Standorten in Abhängigkeit von Bedürfnissen, Routinen und Entscheidungsprozessen. Auf dem Weg zu einem *accessibility planning* wirkt das Mobilitätsverhalten wie ein Filter, da

sowohl die Rahmenbedingungen, als auch die Faktoren der ablaufenden Entscheidungsprozesse nur begrenzt in handhabbare Größen übersetzt werden können. So lassen sich in Erreichbarkeitsmodellen nicht alle vorhandenen Raumwiderstände berechnen. Hinzu kommt, dass diese von einzelnen Personengruppen unterschiedlich wahrgenommen und gewichtet werden. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass sich wahrgenommene und gemessene Erreichbarkeiten erheblich unterscheiden (Lättman *et al.* 2018, S. 509). Zudem erfordern nicht regelmäßig zurückgelegte Wege oder genutzte Verkehrsmittel eine grobe Abschätzung von Raumwiderständen. Diese können von den realen Erreichbarkeitswerten deutlich abweichen (Curl *et al.* 2015, S. 90ff.).

Für den Aufbau und die Anwendung von Erreichbarkeitsmodellen ergeben sich zwei wesentliche Schlussfolgerungen. Erstens ist es notwendig, weitere individuelle Faktoren in die Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren einzubeziehen. Im Rahmen der *time geography* wurden bereits erste Ansätze entwickelt und individuelle Aktionsräume über *space-time prisms* (STP) abgebildet (Hägerstrand 1970; Hägerstrand 1989). Demnach spannt sich um jedes Individuum ein potenziell erreichbarer Raum, in dem Aktivitäten an unterschiedlichen Orten durchgeführt werden können. Zu diesen Ansätzen gehört auch die Nachbildung von Aktivitätenketten, deren Darstellung in regionalen Erreichbarkeitsmodellen aber noch nicht gelungen ist (Liao & van Wee 2017).

Wesentlich bedeutsamer ist jedoch, dass die standortbezogene Erreichbarkeit und damit die Berechnung und Verortung von Interaktionspotenzialen die Grundlage für alle methodischen Weiterentwicklungen darstellt. Sowohl in der Verkehrsmodellierung als auch bei der Berechnung von STP oder Aktivitätenketten spielt die Verortung von Raumwiderständen und Interaktionspotenzialen eine zentrale Rolle. Folglich wird Erreichbarkeit in dieser Arbeit wie folgt definiert: *»Erreichbarkeit ist der an einem Standort erforderliche Aufwand, um Gelegenheiten mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln und zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erreichen«.*

1.2.2 Der Umgang mit Erreichbarkeiten in der Planungspraxis

Da Erreichbarkeit die wesentliche Voraussetzung für die Bedürfnisbefriedigung außerhalb der eigenen Wohnung ist und gleichzeitig Verkehr erzeugt, ist sie im Planungsalltag eine allgegenwärtige Referenz. Ihre Formalisierung ist u. a. Gegenstand in Richtlinien, Verordnungen und Leitfäden. Die Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO) formuliert beispielsweise eine maximale Reisezeit im ÖPNV von 45 Minuten zum nächsten Mittelzentrum als Zielgröße (FGSV 2008, S. 11). Auch im Rahmen der Verkehrsentwicklungsplanung Münchens werden Handlungsansätze formuliert, die die Erreichbarkeit der Innenstadt im ÖPNV deutlich verbessern sollen (Koppen *et al.* 2006, S. 31). Solche Festschreibungen sind jedoch noch die Ausnahme und in ihrem weitgehenden Fehlen wird ein zentrales Hemmnis für die Praxisintegration von Erreichbarkeitsinstrumenten gesehen (Silva *et al.* 2017a, S. 143). Dies gilt auch für Planungen auf Bundesebene, obwohl ein vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS¹) herausgegebener Bericht die zentrale Bedeutung von Erreichbarkeit unterstreicht (BMVBS 2010d, S. 14). Darüber hinaus werden Erreichbarkeiten im Bereich der Daseinsvorsorge im Zusammenhang mit Mindest- und Versorgungsstandards diskutiert. Zu nennen sind die Erreichbarkeit von Schulstandorten und zentralen Orten (BBR & BMVBS 2006, S. 46, 47). Erreichbarkeitsanalysen bieten hier die Möglichkeit, das Versorgungsniveau zu bewerten, die Einhaltung von Mindeststandards zu evaluieren und die Wirkungen einzelner Maßnahmen aufzuzeigen (Ahlmeier & Wittowsky 2018).

Häufig erfolgt ein eher informeller Umgang mit Erreichbarkeit. In diesen Fällen dienen sie der Rauminformationen oder der strategischen Planung. So erstellt das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) für die regelmäßig veröffentlichten Raumordnungsberichte zahlreiche Karten der Erreichbarkeitsverhältnisse auf nationaler

1 Das BMVBS hatte bis zum 16. Dezember 2013 Bestand. Anschließend wurden die Bereiche Bau und Stadtentwicklung ins Umweltministerium ausgelagert. Seit dem 14. März 2018 sind beide Bereiche dem Ministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) zugeordnet.

Ebene (BBSR 2017; Pütz & Schönfelder 2018). Erreichbarkeitsanalysen dienen hier der Raumb Beobachtung und dem Monitoring. Von Seiten des BBSR und des BMVBS wird immer wieder die Sicherung von Erreichbarkeit angemahnt, um die Daseinsvorsorge gerade in ländlichen Gebieten langfristig zu gewährleisten (BBSR 2009). Ansätze sind unter anderem die Stärkung zentraler Orte oder die Anpassung des ÖPNV an die Bedürfnisse älterer Menschen (Ahlmeyer & Wittowsky 2018; BMVBS 2010b; Einig 2015). Erreichbarkeit ist hier vor allem ein Konstrukt, welches der Veranschaulichung unterschiedlicher Herausforderungen dient. Erreichbarkeitsanalysen können darüber hinaus zur Weiterentwicklung des öffentlichen Verkehrsangebotes eingesetzt werden. So werden von der US-amerikanischen Bundesbehörde zur finanziellen und technischen Unterstützung des Nahverkehrs (FTA: Federal Transit Administration) Erreichbarkeitsanalysen eingefordert, wenn Städte mit mindestens 200 Tsd. Einwohnern umfangreiche Änderungen am öffentlichen Verkehrsangebot vornehmen wollen. Wie diese Analysen durchzuführen und welche Mindest erreichbarkeiten zu erzielen sind, wurde indes nicht festgelegt (Karner 2018, S. 24, 25).

Bei der Sicherung der Daseinsvorsorge und der Gewährleistung von Mobilität geht es immer auch um die mögliche soziale Exklusion einzelner Bevölkerungsgruppen. Diese wird über Erreichbarkeitsdefizite operationalisiert und vor allem durch eine geringe Pkw-Verfügbarkeit und ein geringes Einkommen verursacht (Social Exclusion Unit 2003, S. 2ff.). Die Wahrscheinlichkeit einer sozialen Exklusion nimmt mit einer abnehmenden Gemeindegröße zu und ist gerade im Bereich der Versorgung besonders ausgeprägt (BMVBS 2012, S. 43). Entsprechend ist Erreichbarkeit nicht nur aus verkehrs- und raumplanerischer Perspektive interessant, sondern hat auch eine bedeutsame soziale Komponente (Daubitz 2011, S. 184ff.). Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang Großbritannien, wo insbesondere die Mobilitätsbeschränkungen unterschiedlicher Personengruppen unter dem Stichwort der (mangelnden) Erreichbarkeit subsumiert werden. Folglich ist die Erreichbarkeitsplanung ein konzeptioneller Ansatz, um Mobilitätsbeschränkungen zu erkennen und zu reduzieren. Dieses Verständnis wurde maßgeblich durch einen im Jahr 2003 erschienenen Bericht der britischen Regierung geprägt (Social Exclusion Unit 2003). Darin wird die soziale Exklusion

im Verkehr aufgrund von Erreichbarkeitsdefiziten diskutiert. Demnach sind ein erschwerter Zugang zum Verkehrssystem, hohe Reisekosten, die ungünstige Lage von Gelegenheiten, wahrgenommene Unsicherheiten sowie begrenzte etablierte Aktionsradien die fünf wesentlichen Erreichbarkeitshemmnisse (Kilby & Smith 2012, S. 6). Nachdem die Exklusion von Teilen der Bevölkerung aufgrund von Erreichbarkeitsdefiziten identifiziert wurde, erfolgte die Verankerung von Erreichbarkeitsaspekten in den local transport plans² (LTP) (Halden 2014). Seit 2001 müssen alle Districts (UK) einen solchen LTP zur Förderung von Verkehrsinvestitionen mit Bundesmitteln aufstellen (Altenburg *et al.* 2009, S. 36). Diese Verpflichtung behielt auch nach der Verabschiedung des *Local Transport Act 2008* ihre Gültigkeit. Gleichzeitig wird den Verantwortlichen eine größere zeitliche und inhaltliche Flexibilität gewährt und der fünfjährige Turnus abgeschafft.³

1.2.3 Die Erreichbarkeitsanalyse als Planungsinstrument

Wenn Erreichbarkeitsanalysen als Planungsinstrument eingeordnet werden stellt sich die Frage, was Planung überhaupt kennzeichnet. Harris & Batty (1993, S. 184) definieren Planung als »*vorgedachtes*« Handeln, das der Ableitung von Regeln und Weisungen dient. Diese werden anschließend zur Entscheidungsfindung genutzt. Hall & Tewdwr-Jones (2011, S. 1) betonen die Schwierigkeit einer einheitlichen Definition, da gemeinhin verschiedenste Tätigkeiten von unterschiedlichen Personen als »*etwas planen*« verstanden werden. Planen umfasst demnach die »*systematische Abfolge von Handlungen, um ein vordefiniertes Ziel zu erreichen*« (ebd., S. 3). Folglich sind zu erreichende Ziele und Bedingungen zu formulieren. Erreichbarkeitsanalysen im Sinne eines Planungsinstruments erfordern

2 Local transport plans sind ein gesetzlich vorgeschriebenes Instrument zur Kommunikation von Strategien, Zielen und Maßnahmen der regionalen Verkehrsverwaltungen. Sie sollen u.a. die Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen verbessern und sich an den Bedürfnissen benachteiligter Personengruppen orientieren. Die Zugänglichkeit und Verbindungsqualität des Verkehrssystems stehen im Zentrum. Eine rechtliche Bindungswirkung besteht indes nicht (Department for Transport 2004, S. 6). Sie sind mit den deutschen Nahverkehrsplänen zu vergleichen.

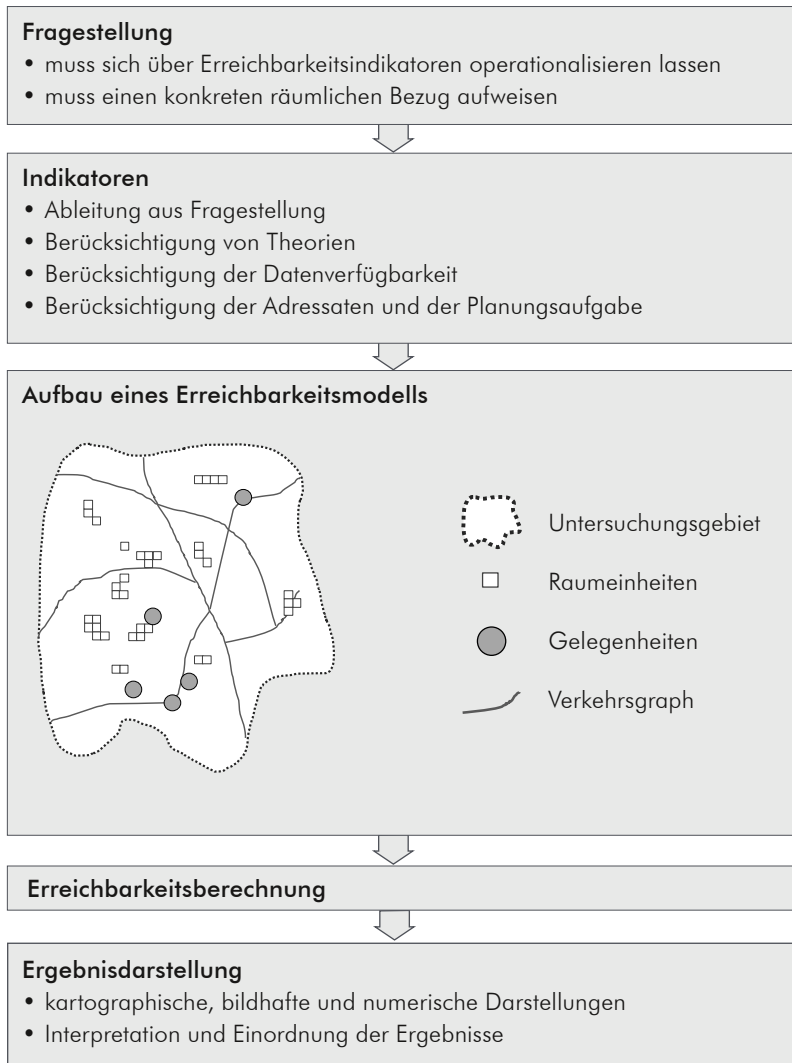
3 <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/26/notes> (letzter Zugriff: 04.06.2021)

also die normative Bewertbarkeit der dargestellten Indikatoren. Weiterhin ist es notwendig, eine möglichst genaue Abschätzung von Wirkungen unterschiedlicher Handlungsschritte vorzunehmen und diese zu vergleichen. Noch in den 1980er Jahren war der Gebrauch von Computern für diese Aufgaben völlig unüblich (Harris 1989, S. 85). In den folgenden Jahren haben sich jedoch vor allem in der räumlichen Planung *planning support systems* (PSS) als Überbegriff für unterschiedliche computerbasierte Anwendungen etabliert. Ein PSS ist die funktionale Verknüpfung von Planungstheorien, spezifischen Planungsaufgaben, Arten der Informations- und Datenverarbeitung sowie einheitlichen räumlichen Bezugssystemen (Harris & Batty 1993, S. 187). Obwohl diese Einordnung den Einsatz von PSS in verschiedensten Anwendungsbereichen antizipiert, haben spätere Definitionen eine ausdrückliche Anwendung im Zusammenspiel mit Geoinformationssystemen (GIS) unterstrichen (Vonk 2006, S. 19). Entsprechend sind Geoinformationssysteme ein bedeutsames Beispiel für planungsunterstützende Systeme (PSS) (Harris 1989, S. 90).

Erreichbarkeitsanalysen als planungsunterstützendes System

Erreichbarkeitsanalysen werden für die Beantwortung von Fragestellungen eingesetzt, die sich über Erreichbarkeitsindikatoren operationalisieren lassen und einen räumlichen Bezug besitzen (vgl. Abbildung 2). Ihr wesentliches Werkzeug ist die Erreichbarkeitsberechnung auf Basis von Erreichbarkeitsmodellen. Die letzte Phase einer Erreichbarkeitsanalyse beinhaltet die Interpretation und Darstellung der Ergebnisse. Insofern geht die Erreichbarkeitsanalyse über den bloßen Modellaufbau und die Modellberechnung deutlich hinaus. Unterschiedliche Autoren kommen zu der Einschätzung, dass Erreichbarkeitsanalysen als ein Bestandteil von PSS anzusehen sind (Silva *et al.* 2017a; te Brömmelstroet & Bertolini 2008). In der räumlichen Planung dienen sie in diesem Sinne der Erreichbarkeitsbewertung mit Hilfe computerbasierter Instrumente (Papa *et al.* 2016, S. 57). Die für die Durchführung notwendigen Erreichbarkeitsmodelle erfordern den Einsatz von Informationstechnik, da sowohl der Datenbedarf, als auch die notwendigen Rechenschritte zumeist kein analoges Vorgehen ermöglichen. Aufgrund der räumlichen Grundierung sämtlicher Erreichbarkeitsdefinitionen werden

Abbildung 2: Phasen einer Erreichbarkeitsanalyse



Quelle: eigene Darstellung

die Berechnungen mit Hilfe von GIS durchgeführt. Eine scharfe Trennung zwischen GIS und Erreichbarkeitsmodellen ist in der Wissenschaft jedoch nicht etabliert.

Ein GIS wird mitunter als ein Set von Werkzeugen beschrieben, welches den Aufbau und die Anwendung räumlicher Modelle ermöglicht (Geertman & Ritsema van Eck 1995, S. 67, 68). Ein Modell wird als der »kohärente bildhafte Ausschnitt der Realität verstanden, welche über ein System verbundener Elemente repräsentiert« wird (ebd., S. 68). In Erreichbarkeitsmodellen sind dies u.a. Raumeinheiten, Verkehrsgraphen, Gelegenheiten und Personen. Die Verbindungen zwischen diesen Elementen werden beispielsweise über Bedürfnisse, Fähigkeiten und Raumwiderstände abgebildet. GIS-Werkzeuge wie die Netzwerkanalyse ermöglichen es, Berechnungen mit diesem Modell durchzuführen. Andere Autoren kommen jedoch zu dem Schluss, dass ein GIS bereits eine modellhafte Abbildung der Wirklichkeit darstellt (Burrough 1986, S. 7). Dieser Einordnung folgend ist ein Erreichbarkeitsmodell grundsätzlich auch ein GIS. Die Erreichbarkeitsanalyse geht über den bloßen Modellaufbau und die Modellanwendung hinaus, da die Ergebnisse auf Grundlage vorab definierter Ziele und Normen reflektiert und eingeordnet werden. Ein GIS ist aber die elementare Grundlage einer jeden Erreichbarkeitsanalyse (Geertman & Ritsema van Eck 1995, S. 68).

Abgrenzung zu weiteren Modellansätzen

Wie bereits in Abschnitt 1.2.1 ausgeführt, existieren in den Verkehrs- und Raumwissenschaften weitere Modellansätze, die auch auf der Berechnung von Raumwiderständen und Interaktionspotenzialen basieren. Die Erreichbarkeitsberechnung in ihrer grundlegenden Variante kann somit als ein Bestandteil der deutlich komplexeren Verkehrsmodelle sowie integrierten Landnutzungs- und Verkehrsmodelle (LUTI⁴) angesehen werden. Im Unterschied zu Erreichbarkeitsmodellen dienen Verkehrsmodelle der Abschätzung der tatsächlichen Verkehrsnachfrage (vgl. Tabelle 1). Die tatsächliche Verkehrsnachfrage basiert einerseits auf

4 Auf internationaler Ebene werden integrierte Landnutzungs- und Verkehrsmodelle zumeist unter dem Begriff der »land use-transport interaction (LUTI models« zusammengefasst (Acheampong & Silva 2015, S. 11).

der Erreichbarkeit von Zielen und andererseits auf Personenmerkmalen und Verhaltensparametern. Ob, wie häufig und mit welchem Verkehrsmittel ein Hausarzt aufgesucht wird hängt auch vom Alter, dem Autobesitz und dem Einkommen von Personen ab. Über Verhaltensparameter wird die individuelle Gewichtung von Zielgrößen und Raumwiderständen abgebildet. So ist die Bereitschaft längere Distanzen zurückzulegen oder den ÖPNV zu nutzen in abgegrenzten (verhaltenshomogenen) Bevölkerungsgruppen unterschiedlich ausgeprägt.

Mit Hilfe von Verkehrsmodellen ist es möglich, Änderungen in der Verkehrsnachfrage aufgrund von Veränderungen am Verkehrs- und Siedlungssystem (Straßenbau, Taktverdichtung, Wohnstandortentwicklung) zu simulieren. Da Erreichbarkeit die Verkehrsnachfrage wesentlich beeinflusst, wird diese von Verkehrsmodellen zumindest indirekt mitberechnet. Entsprechend können Erreichbarkeitsanalysen auch mit Verkehrsmodellen durchgeführt werden, wenngleich in einer geringeren räumlichen Auflösung. Die Landnutzung, also u. a. die räumliche Verteilung der Wohnbevölkerung, beeinflusst jedoch nicht nur die Verkehrsnachfrage, vielmehr handelt es sich um ein komplexes, sich gegenseitig bedingendes System. So hängen Umzugsentscheidungen oder die Ansiedlung von Unternehmensstandorten auch vom lokalen Verkehrsangebot und den erreichbaren Raumstrukturen ab. Die Simulation dieser Abhängigkeitsverhältnisse wird mit Hilfe von LUTI Modellen durchgeführt (Wegener 2014, S. 741). Diese besitzen die höchste Komplexität und erzeugen den größten Ressourcenaufwand da sowohl Erreichbarkeiten als auch die Verkehrsnachfrage simuliert werden müssen. Zusätzlich erfolgt die Abschätzung von Standortentscheidungen, welche sowohl die Erreichbarkeit als auch die Verkehrsnachfrage zusätzlich beeinflussen.

Verkehrsmodelle und LUTI Modelle basieren zumeist auf relativ wenigen Verkehrszellen, da die Verkehrsbeziehungen zwischen allen räumlichen Einheiten berücksichtigt werden und zusätzlich eine Gewichtung über Verhaltensparameter erfolgt. Entsprechend hoch ist die Aggregation der Raumbezugssysteme, Gelegenheiten und Personengruppen. In beiden Modellen wird ein über mehrere Rechenschleifen angenähertes Gleichgewicht ermittelt (Lohse 1997, S. 3; Schnabel&Lohse 1997, S. 181ff.). In LUTI Modellen sind zusätzlich Standortentscheidungen zu modellieren. Da beide Modelle insbesondere der Berechnung von Szenarien

Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher Modellansätze

	Erreichbarkeitsmodell	Verkehrsmodell	Integriertes Modell
Fokus	Einfachheit von Ortsveränderungen <i>Erreichbarkeitsanalyse</i>	Prognose von Ortsveränderungen <i>Verkehrsprognose</i>	Prognose von Ortsveränderungen und Standortentscheidungen (Wohnen, Arbeit etc.)
Beispiel	Reisezeit der Einwohner zum nächsten Hausarzt	Prognose der Nachfrage auf einer neuen Buslinie	Prognose des Wanderungsverhaltens aufgrund von Raumwiderständen
Grundlage	Verteilung von Gelegenheiten, Raumwiderstände auf Verkehrsgraphen	Erreichbarkeiten, Personenmerkmale, Verhalten, Landnutzungen, Kapazitäten	siehe Verkehrsmodell, zzgl.: Immobilienpreise, Mietpreise, Energiekosten etc.
Raumbezug	Raster, administrative Gebiete, Verkehrszellen	Verkehrszellen, Agenten, Personengruppen	Verkehrszellen, Agenten, Personengruppen
Aggregation	gering	gering bis hoch	hoch
Formalisierung	gering	hoch	gering
Ressourcenbedarf	gering bis hoch	hoch	sehr hoch
Anwendung	nicht etabliert	etabliert	nicht etabliert

Quelle: eigene Darstellung

dienen, werden kurze Rechenzeiten angestrebt. Es existieren einzelne agentenbasierte LUTI Modelle, die auf eine räumliche Aggregation verzichten (Acheampong & Silva 2015, S. 14). Zumeist wird jedoch eine Raumeinteilung verwendet, die rund 500 bis 2 Tsd. Zellen umfasst (Löwa 2017, S. 13). So ist in der Verkehrsmodellierung die Unterscheidung zwischen mikroskopischen und makroskopischen Ansätzen üblich. In mikroskopischen Modellen erfolgt die Simulation über Einzelereignisse (Agenten, Fahrzeuge, Ampelphasen etc.), in makroskopischen über Durchschnittswerte (verhaltenshomogene Personengruppen, durchschnittliche Verzögerungen an Knoten, durchschnittliche Fahrzeuggrößen) (Schnabel & Lohse 1997, S. 221). Erreichbarkeitsmodelle sind zumeist wesentlich geringer aggregiert. Sie umfassen hochaufgelöste Raumbezugssysteme sowie standorttreue Gelegenheiten. Die hohe Auflösung der Raumstruktur erfordert, gerade im Unterschied zu Verkehrsmodellen, den Einsatz wesentlich detaillierterer Verkehrsgraphen. Mit Erreichbarkeitsmodellen ist es also möglich, eine wesentlich genauere Darstellung räumlicher Interaktionspotenziale zu erzielen.

Die vorgestellten Modelle unterscheiden sich auch hinsichtlich ihrer praktischen Anwendung. Der Einsatz von Verkehrsmodellen in der Raum- und Verkehrsplanung ist als etabliert zu bezeichnen (Löwa 2017; te Brömmelstroet *et al.* 2017). Und dies, obwohl ihr Aufbau und ihr Einsatz einen erheblichen finanziellen und zeitlichen Ressourcenaufwand bedeuten (Softwarekosten, Mitarbeiterschulungen etc.). Ein zentraler Grund ist ihre Verwendung im Rahmen der standardisierten Bewertung (ITP & VWI 2006). Daher unterliegt ihr Aufbau klaren Regeln und einer hohen Formalisierung (FGSV 2018; Schnabel & Lohse 1997). Auch den LUTI Modellen wurde in der Vergangenheit eine zunehmende Relevanz in der Planung vorausgesagt (Wegener 2004, S. 2ff.). Im Unterschied zu Verkehrsmodellen ist ihre breite Anwendung bis heute nur sehr eingeschränkt gelungen. Beispielsweise nennen in den USA 64% aller Verkehrsbehörden, die ein solches Modell im Einsatz haben, das fehlende Expertenwissen auf Mitarbeiterseite als ein wesentliches Hemmnis (Moeckel *et al.* 2018, S. 472). Hinzu kommen die anspruchsvolle Kalibrierung, die fehlende Operationalisierung und Transferierung unterschiedlicher Einflussgrößen, der hohe Rechenaufwand und die damit einhergehenden langen Rechenzeiten sowie die fehlende Finanzierungsbereitschaft (Wegener 2011, S. 4ff.).

Erreichbarkeitsindikatoren und ihre praktische Relevanz

Obwohl die praktische Relevanz und Nutzbarkeit verschiedener Erreichbarkeitsindikatoren nicht bezweifelt wird, ist ihre Praxisintegration bisher nicht gelungen (Papa *et al.* 2016; te Brömmelstroet *et al.* 2016). In diesem Kontext sind Reiseaufwands- und Kumulationsindikatoren von besonderer Bedeutung, da sie Eingang in zahllose Regelwerke und Forschungsarbeiten gefunden haben (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Reiseaufwandsindikatoren ermöglichen die Darstellung von Raumwiderständen zwischen Startpunkten und nächstgelegenen Orten eines bestimmten Gelegenheitstyps, etwa der Entfernung zum nächsten Supermarkt (Geurs & van Wee 2004, S. 132). Im Kontext der Daseinsvorsorge werden sie häufig im Zusammenhang mit (Mindest-)Standards diskutiert (BMVBS 2010d). So geben einzelne Bundesländer maximale Reisezeiten vor, in denen nächstgelegene Schulen erreichbar sein müssen (BMVBS 2010a, S. 30). Auch die Festlegung von Schuleinzugsgebieten, welche wiederum auf Basis von Reisezeiten oder Distanzen abgegrenzt werden, erfolgt in einigen Bundesländern (ebd., S. 7). Für die Regional- und Landesplanung sind die Reisezeiten zu nächstgelegenen zentralen Orten sowie die Abgrenzung ihrer Mittelbereiche relevant (FGSV 2008, S. 11). Reiseaufwandsindikatoren unter Verwendung hoch aufgelöster Erreichbarkeitsmodelle ermöglichen auf kleinräumiger Ebene die Berechnung von Reisezeiten mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln zu zentralen Orten und die Evaluation vorab definierter Standards. Einzelne Fragestellungen erfordern jedoch nicht nur die Betrachtung nächstgelegener, sondern die Berechnung insgesamt erreichbarer Ziele. In diesem Zusammenhang kommen Kumulationsindikatoren zum Einsatz, da sie die Berechnung der insgesamt erreichbaren Gelegenheiten unter Einhaltung maximaler Reiseaufwendungen ermöglichen. Beispielsweise die innerhalb einer bestimmten Reisezeit erreichbaren Hausärzte. Je mehr Hausärzte erreicht werden, desto einfacher ist die Befriedigung individueller Präferenzen und desto geringer sind die negativen Auswirkungen von Praxisschließungen.

Neben den standörtlichen Erreichbarkeiten werden häufig auch infrastrukturbasierte Erreichbarkeiten verwendet, um insbesondere das ÖPNV-Angebot zu bewerten (Geurs & van Wee 2004, S. 131). Zu nennen sind hier die Reisegeschwindigkeit, die Häufigkeit von Verbindungen zwischen

Tabelle 2: Ausgewählte Anwendungsbereiche standortbezogener Erreichbarkeiten

	Reiseaufwandsindikatoren	Kumulationsindikatoren
Definition nach Schwarze (2015, S. 54)	<i>Akkumulierter Reiseaufwand zu einem definierten Quantum an Aktivitätsgelegenheiten</i>	<i>Akkumulierte Aktivitätsgelegenheiten innerhalb eines definierten Reisebudgets</i>
Daseinsvorsorge	<ul style="list-style-type: none"> • Überschreitung maximaler Beförderungszahlen im Schulbusverkehr • Darstellung nächstgelegener Schulen im Zusammenhang mit Schulbezirken • Überprüfung maximaler Fahrzeiten zur nächstgelegenen Kita • Evaluierung der Versorgung mit Hausärzten im ländlichen Raum • Darstellung der Reisezeiten zu nächsten Einkaufsgelegenheiten des täglichen Bedarfs 	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl an Hausärzten, die in einer zumutbaren Zeit erreicht werden kann • Anzahl an Schülern, für die ein Schulstandort der nächstgelegene ist • Anzahl an Kindern, für die eine Kita die nächstgelegene ist und Vergleich mit dem Betreuungsangebot
Regional- und Landesplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Abgrenzung von Kongruenzräumen zentraler Orte auf Basis von Reisezeiten • Vergleich der Mittelbereiche unterschiedlicher Verkehrsmittel • Reisezeit zum nächsten Oberzentrum mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln • Konkurrenzfähigkeit des ÖPNV auf Basis von Reisezeitvergleichen zu Zielen der Daseinsvorsorge • Identifikation von Räumen, die außerhalb von Schulverkehren und am Wochenende kein (ausreichendes) ÖPNV-Angebot zu zentralen Orten aufweisen 	<ul style="list-style-type: none"> • Einwohner im Einzugsbereich neuer und bestehender Einkaufseinrichtungen größeren Umfangs (Tragfähigkeitsschwellen) • Verhältnis von Einwohnerzahl und Menge in bestimmter Reisezeit erreichbarer Arbeitsplätze • Anzahl an Einwohnern im Umkreis von Haltestellen • Anzahl an Einwohnern, die nicht innerhalb einer bestimmten Distanz zur nächsten (Bahn-)Haltestelle wohnen

Quelle: eigene Darstellung

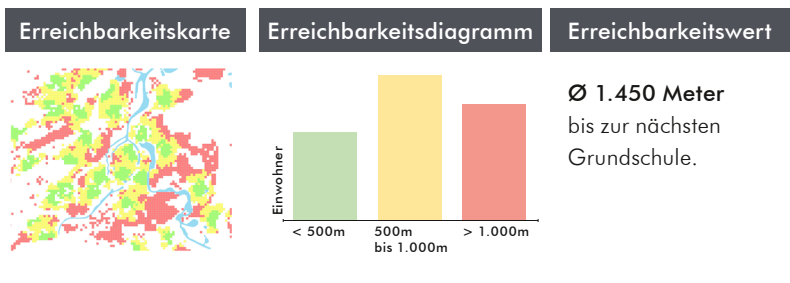
Haltestellen oder die Anzahl stündlicher Abfahrten (Schwarze 2005, S. 12ff.). So wird etwa auf europäischer Ebene und auch in der Schweiz die Qualität des ÖPNV-Angebotes u. a. über die Anzahl stündlicher Abfahrten in Kombination mit der Art des öffentlichen Verkehrsmittels (Bus, Bahn etc.) bewertet (ARE 2010; Poelman & Dijkstra 2015).

Darstellungsarten in Erreichbarkeitsanalysen

Ungeachtet ihrer Einbindung in konkrete Planungskontexte erfolgt die Operationalisierung von Erreichbarkeiten immer über Erreichbarkeitsindikatoren (vgl. Absatz 2.1). Diese ermöglichen die Berechnung von Kennwerten bezogen auf einen konkreten Anwendungsfall. Die Berechnung, visuelle Aufbereitung, Einordnung und Interpretation von Erreichbarkeitsindikatoren ist Gegenstand von Erreichbarkeitsanalysen. Diese werden nahezu ausschließlich mit Hilfe von Informationstechnik unter Nutzung von Erreichbarkeitsmodellen durchgeführt. Gleichwohl können u. a. Isochronen (vgl. Glossar) auch mit Hilfe einfacher Zeichnungen dargestellt werden, wie schon im Generalregulierungsplan für Wien von 1893 gezeigt (Koerner 2017, S. 39; Wagner 1893).

Drei unterschiedliche Darstellungsformen sind in Erreichbarkeitsanalysen zu unterscheiden (vgl. Abbildung 3). Häufig erfolgt die Gleichsetzung von Erreichbarkeitsanalysen mit umfangreichen Kartenwerken. Zu diesen gehören kartographische Darstellungen von Isochronen oder von erreichbaren Arbeitsplätzen. Auch die Darstellung komplexerer Indikatoren ist denkbar. Zu diesen gehören auch die durchschnittlichen Reisezeiten zu nächstgelegenen Zielen im Tagesverlauf (Farber *et al.* 2016)

Abbildung 3: Beispiele für die Darstellung von Erreichbarkeit



Quelle: eigene Darstellung

oder der Umfang erreichbarer Ziele innerhalb bestimmter Zeitintervalle (El-Geneidy *et al.* 2016; Stępnia *et al.* 2019). Kartendarstellungen dienen der Visualisierung von Erreichbarkeitsverhältnissen auf räumlicher Ebene. Um etwa die Bevölkerungsteile darzustellen, die von bestimmten Erreichbarkeitswerten betroffen sind, wird von Madelin *et al.* (2009, S. 656) eine »Kartographie von Quoten« vorgeschlagen.

Die empfohlenen Darstellungen sind jedoch aufwendig in der Erstellung und anspruchsvoll in der Interpretation. Wesentlich verbreiteter ist die Erstellung von Quoten über Diagramme. So ist es u. a. möglich, die mit einem Erreichbarkeitsniveau konfrontierte Bevölkerung in Gebieten aufzusummieren. Auch können Erreichbarkeiten auf Ebene generalisierter Raumbezugssysteme abgebildet werden. Ein Beispiel ist die Darstellung von Reisezeiten und Bedienungshäufigkeiten zwischen zentralen Orten im öffentlichen Verkehr auf einem einfachen Spinnennetz (Wulforst *et al.* 2010, S. 33). Die einfachste Ergebnisdarstellung im Rahmen von Erreichbarkeitsanalysen erfolgt indes über Erreichbarkeitswerte. Etwa die Menge an Einwohnern, die innerhalb von 30 Minuten das nächste Mittelzentrum erreichen kann. Üblicher ist jedoch die tabellarische Aufbereitung wesentlich komplexerer Erreichbarkeitswerte. Aufgrund der hohen Aggregation sind räumliche Darstellungen zumeist nicht möglich.

1.2.4 Die Besonderheiten regionaler und kleinräumiger Erreichbarkeitsmodelle

Die Erreichbarkeitsanalyse ist ein Planungsinstrument, welches bei unterschiedlichen Fragestellungen zum Einsatz kommen kann (Hull *et al.* 2012; Papa *et al.* 2016). Diese Fragestellungen besitzen in der Regel eine zumindest regionale Grundierung. Als Region wird innerhalb der öffentlichen Planung zumeist eine administrative Einheit bezeichnet (Bathelt & Glückler 2012, S. 74). Dies können Ortsteile und Gemeinden, aber auch ganze Bundesländer und Nationalstaaten sein. In Deutschland hat sich jedoch ein Begriffsverständnis durchgesetzt, welches die Region in Form der regionalen Ebene zwischen der kommunalen und der Landesebene positioniert (Hülsmann & König 2017). Ihr wesentliches Handlungsfeld ist die Regionalplanung. Darin werden »die Grundsätze und Ziele der landesweiten Raumordnungspläne für Teilräume des

jeweiligen Landesgebiets konkretisiert« (ebd.). Ihre Träger sind entweder zu (regionalen) Planungsverbänden zusammengeschlossene Landkreise und Gemeinden oder die zuständigen Landesplanungsbehörden (ARL o.J.c). Es handelt sich also immer um Gebietszuschnitte, die mehrere Landkreise umfassen.

Eine Besonderheit bilden die elf nach der Ministerkonferenz für Raumordnung im Jahre 1995 gegründeten Metropolregionen (ARL o.J.b). Ihre Flächen sind mit der Größe vieler Bundesländer vergleichbar. Die Metropolregionen Hamburg, Mitteldeutschland, Rhein-Main und Rhein-Neckar umfassen Kreise in mindestens zwei Bundesländern. Unter der Bezeichnung regionales Modell wird in dieser Arbeit ein Gebiet adressiert, welches mehrere Landkreise umfasst, eine mit Flächenländern vergleichbare Größe aufweist und beispielsweise auch erweiterte Stadt Umland-Regionen oder Metropolregionen enthalten kann. Diese Definition schließt auch ganze Bundesländer oder Landgrenzen überschreitende Zuschnitte ein.

Die Bedeutung von Erreichbarkeitsanalysen für regionale Gebietskörperschaften resultiert aus ihren Zuständigkeiten und Aufgaben. Zu diesen gehören u. a. Raumentwicklungs- und Nahverkehrspläne, die häufig durch kommunale Planungsgesellschaften für mehrere Landkreise aufgestellt werden. Ebenso wirken im Bereich der Daseinsvorsorge Prozesse, die keine ausschließlich lokale Betrachtung ermöglichen. Ob Obergrenzen zu erreichen sind, wie sich die Versorgungssituation zwischen ländlichen und städtischen Räumen unterscheiden und welche Reisezeitunterschiede zwischen öffentlichen Verkehrsmitteln und privaten Pkw auf Arbeitswegen bestehen, lässt sich nur auf regionaler Ebene beantworten und beeinflussen. Natürlich können Erreichbarkeitsanalysen auch auf kommunaler und lokaler Ebene durchgeführt werden. Gerade im Bereich der Daseinsvorsorge gibt es zahlreiche Anwendungsfälle, die im Gemeindekontext angesiedelt sind (beispielsweise die Erreichbarkeit von Kitas). Der Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen für solche lokalen Untersuchungen ist jedoch unüblich, da der Aufwand den erwarteten Nutzen deutlich übersteigt und die geforderten Kennzahlen mitunter auch über einfache webbasierte Verbindungsabfragen manuell durchgeführt werden können. Infolgedessen sind Erreichbarkeitsmodelle

in der Regel auf regionaler Ebene angesiedelt (Subsidiaritätsprinzip⁵), wengleich diese auch der Darstellung von Naherreichbarkeiten dienen können (Schwarze 2015). Aufbau und Pflege regionaler Modelle weisen jedoch einige Herausforderungen auf:

- lange Berechnungszeiten
- geringe Flexibilität
- hoher Datenbedarf
- häufige Sonderfälle und fehlendes lokales Wissen
- schwierige Verstetigung
- aufwendige Integration öffentlicher Verkehre inkl. Beschaffung der Fahrplandaten

Die zumeist regionale Ausrichtung von Erreichbarkeitsmodellen hat sich in der Vergangenheit kaum verändert. Schon zwischen 1977 und 1982 wurde am Österreichischen Institut für Raumplanung (ÖIR) ein landesweites Erreichbarkeitsmodell aufgebaut (Deußner 1996, S. 2). Weitere Modelle mit einem nationalen und supranationalen Fokus folgten in den 1990er Jahren (Spiekermann & Neubauer 2002; Schürmann *et al.* 1997).

Bedeutsam ist die Kleinräumigkeit (vgl. Glossar), also die hohe räumliche Auflösung dieser regionalen Modelle. Früher wurden Erreichbarkeiten nur auf Ebene von Gemeinden oder Landkreisen berechnet. Um die Modelle auch für unterschiedliche Fragestellungen auf lokaler Ebene und für den NMIV (nichtmotorisierter Individualverkehr) zur Anwendung zu bringen, wurden die administrativen Einheiten zunehmend höher aufgelöst. Heute werden Erreichbarkeitsmodelle in der Regel entweder unter Verwendung geometrischer Raster (Peter & Gertz 2017; Schwarze 2015) oder unregelmäßiger statistischer Einheiten aufgebaut (Farber & Fu 2017; Owen & Levinson 2015). Spiekermann & Wegener (2000, S. 1) sprechen in diesem Zusammenhang auch von der Befreiung von der *Tyrannie der Zonen*, da symmetrische und regelmäßige Raster den Einfluss von Aggregationsfehlern auf die Modellergebnisse reduzieren.

5 »Subsidiarität ist ein gesellschaftspolitisches Prinzip, nach dem übergeordnete Instanzen (z. B. der Bund) nur solche Aufgaben übernehmen sollen, zu deren Wahrnehmung nachgeordnete Instanzen (z. B. die Länder oder Kommunen) nicht in der Lage sind.« (ARL o.J.d).

Diese zunehmende Detaillierung erzeugt jedoch zahlreiche Probleme, die sich über die reduzierte Nutzbarkeit kleinräumiger Modelle zusammenfassen lassen. Die zunehmende Verwendung hochaufgelöster Raster in Kombination mit adressgenauen Gelegenheiten führt insbesondere zu steigenden Rechenzeiten, obwohl die Rechenkapazitäten gewöhnlicher Arbeitsrechner stetig wachsen. Diese Leistungsgewinne werden jedoch nicht ausschließlich in reduzierte Rechenzeiten investiert, sondern auch in zusätzliche Rechenbedarfe. Um räumliche Modelle dennoch nutzbar zu halten ist es denkbar, das Level der Aggregation vom Untersuchungsgegenstand abhängig zu machen. Sie also »so detailliert wie nötig und so einfach wie möglich« aufzubauen (Wegener 2011, S. 162). Solow (1973, S. 267) veranschaulicht dies am Beispiel einer Spitfire (britisches Jagdflugzeug), die in ein Modell übertragen werden soll. Demnach ist es der Traum der meisten Modellierer, ein 1-zu-1 Modell in einem geringeren Maßstab zu erschaffen. Doch am Ende stünde nichts anderes, als eine Spitfire. Ohne jede Vereinfachung hätte das Modell keinen Wert (Wegener 2011, S. 170). Daher liegt der Schluss nahe, dass gerade Big Data zu einer stärkeren Detaillierung von Modellen bei gleichzeitiger Vernachlässigung der theoretischen Herleitung führt (Masser & Wegener 2016, S. 1159). Folglich sollten die theoretischen Grundlagen von Erreichbarkeitsmodellen weiterentwickelt und nicht lediglich die Grenzen des technisch Machbaren ausgereizt werden.

1.2.5 Die Bedeutung multimodaler Erreichbarkeitsmodelle

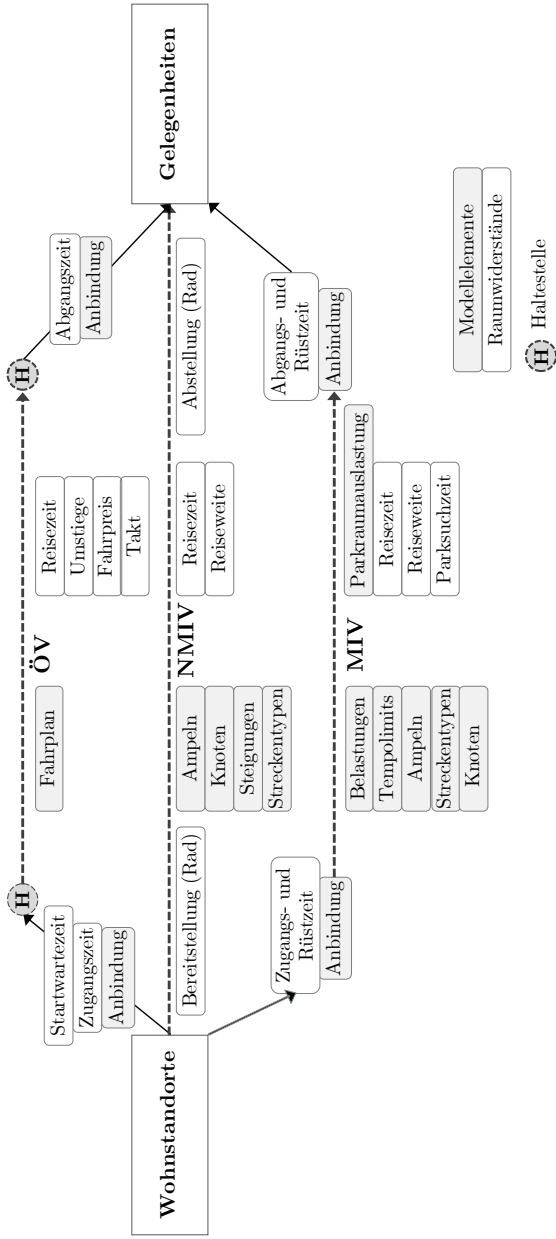
Die potenziellen Anwendungszwecke von Erreichbarkeitsanalysen machen eine multimodale, also alle Verkehrsmodi umfassende Betrachtung unabdingbar. So werden im Bereich der Daseinsvorsorge für unterschiedliche Verkehrsmodi maximale Reisezeiten genannt, in denen die nächstgelegene Kindertagesstätte oder Schule erreicht werden soll (BMVBS 2010d, S. 7). Da die Verlagerung der Verkehrsnachfrage auf die Verkehrsmittel des Umweltverbundes (ÖV, NMIV) ein übergeordnetes planerisches Ziel darstellt, sind Reisezeitvergleiche unverzichtbar. Frühere Studien konnten zeigen, dass eine hohe Erreichbarkeit des ÖPNV im Vergleich zum MIV zu einer stärkeren Nutzung führt (Kawabata &

Shen 2006; Kwok & Yeh 2004; Shen 1998). Der ÖPNV ermöglicht darüber hinaus auch jenen Personengruppen räumliche Interaktionen, die von der Pkw-Nutzung ausgeschlossen sind. Unter dem Stichwort des *spatial mismatch* wurde lange diskutiert, ob räumliche Barrieren zwischen Personen mit geringem Einkommen und Arbeitsplätzen die soziale Ausgrenzung verstärken (Grengs 2010; Kain 1968). Unterschiedliche Studien konnten jedoch zeigen, dass dieser *spatial mismatch* nicht durch räumliche Distanzen, sondern aufgrund unterschiedlicher Verkehrsangebote konstruiert wird (Grengs 2010; Shen 1998; Hess 2005). Eine ausschließliche Betrachtung von Distanzen oder monomodalen Raumwiderständen ist insofern nicht in der Lage, Mobilitätshemmnisse benachteiligter Personengruppen hinreichend zu beschreiben.

Während bei monomodalen Ansätzen die Plausibilität der Widerstandsberechnung im Zentrum steht, ist bei multimodalen Modellen außerdem die Konsistenz zwischen den Widerstandswerten der einzelnen Verkehrsmittel bedeutsam. Ein monomodales MIV-Modell, welches auf die Berücksichtigung von Parksuchverkehren sowie fußläufigen Zu- und Abgängen verzichtet, würde gerade in Innenstädten unrealistisch kurze Reisezeiten ausgeben. Werden diese Reisezeiten dann in einem multimodalen Modell mit jenen des ÖV verglichen, kann diese Vereinfachung zu einer Unterschätzung der Konkurrenzfähigkeit öffentlicher Verkehrsangebote führen. Abbildung 4 zeigt Raumwiderstände, die auf unterschiedlichen Wegen auftreten können. Diese werden durch unterschiedliche Barrieren hervorgerufen, die ihrerseits in Modellelemente zu übersetzen sind. Eine für alle Verkehrsmodi homogene und konsistente Berechnung von Raumwiderständen muss auf einer vergleichbaren Detaillierung aller Modellelemente beruhen.

Salonen & Toivonen (2013) haben am Beispiel von Helsinki gezeigt, dass die Detaillierung von Wegen einen hohen Einfluss auf das Reisezeitverhältnis zwischen dem MIV und dem ÖV aufweist (ebd., S. 149). Werden in einem Erreichbarkeitsmodell zwar ÖV-Fahrpläne aber keine Verkehrsbelastungen berücksichtigt, kann dies zu einer fehlerhaften Darstellung der Wettbewerbsfähigkeit öffentlicher Verkehrsmittel führen. Die Verwendung durchschnittlicher Fahrtzeiten auf ÖV-Linienwegen könnte die Vergleichbarkeit der Reisezeiten erhöhen (Salonen & Toivonen 2013, S. 149). Die maximale Genauigkeit der Fahrtzeitberechnung im

Abbildung 4: Raumwiderstände und Widerstandsparameter der Verkehrsmodi



Quelle: eigene Darstellung

MIV kann indes nur über die Berücksichtigung von parking related travel costs (PRZ) erzielt werden. Da gerade die Quantifizierung von Parksuchverkehren eine erhebliche methodische Herausforderung darstellt, wird zumeist auf konstante Aufschläge zurückgegriffen (FGSV 2008, S. 47). Dies führt unter Verwendung von Erreichbarkeitsmodellen mit einem Tür-zu-Tür-Ansatz immer wieder dazu, dass die auf Fahrplänen basierenden ÖV-Reisezeiten im Vergleich zu einfacher berechneten MIV-Reisezeiten überschätzt werden (Benenson *et al.* 2011; Benenson *et al.* 2017b; Salonen & Toivonen 2013). Gleichwohl zeigte sich, dass die zunehmende Detaillierung von MIV-Modellen zu einer Reduzierung der Reisezeitunterschiede zwischen beiden Verkehrsmodi führt.

Mit dem Aufbau multimodaler Erreichbarkeitsmodelle sind Schwierigkeiten verbunden, die sich auf regionaler Ebene im Zusammenspiel mit einer hohen räumlichen Auflösung weiter verstärken. Hinzu kommt, dass sich der Individual- und der öffentliche Verkehr hinsichtlich der Modellierungsansätze und der späteren Modellberechnung grundsätzlich unterscheiden (vgl. Tabelle 3). So ist gerade die Bereitstellung und jährliche Aktualisierung von Fahrplandaten mit einem hohen Aufwand verbunden. Ohne solche Daten ist es jedoch nur sehr begrenzt möglich, selbst einfache Netzmodelle des öffentlichen Verkehrs aufzubauen. Im Vergleich dazu sind die Verkehrswege des Individualverkehrs auf OpenStreetMap frei zugänglich (OSM o.J.). Auch Aktualisierungen sind seltener durchzuführen, da sich die Netze nur punktuell, insbesondere im Autobahnbau, grundlegend ändern.

Anders als im ÖV und NMIV, ist für die im Straßennetz realisierbaren Geschwindigkeiten die Gesamtbelastung entscheidend. Reduzierte Reisezeiten aufgrund einer hohen Belastung können über vereinfachte Annahmen, Verkehrsmodelle oder kommerzielle Daten von Drittanbietern ermittelt werden (Owen & Levinson 2012, S. 27). In einem belasteten Netzmodell ist die zu einem Zeitpunkt tatsächlich vorhandene Fahrzeugbelastung bzw. Auslastung des Streckennetzes hinterlegt und damit die Berechnung genauer Reisezeiten möglich. Verkehrsmodelle und kommerzielle Daten erfordern jedoch einen erheblichen finanziellen oder zeitlichen Aufwand. Eine weitere Schwierigkeit ist die Verwendung unterschiedlicher Routingverfahren (vgl. Abschnitt 2.3.3). Im Individualverkehr wird ein einfaches ungerichtetes (keine getrennten Richtungen)

Tabelle 3: Anforderungen des IV und ÖV an Erreichbarkeitsmodelle

	Individualverkehr	Öffentlicher Verkehr
Daten- verfügbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> frei verfügbar unter openstreetmap.de; hoher Aufbereitungsaufwand kommerzielle Bereitstellung belasteter Netze (z. B. Navteq, TomTom) 	<ul style="list-style-type: none"> teilweise frei verfügbare GTFS-Daten* abhängig von der Bereitschaft externer Stellen automatisiertes Auslesen von Fahrplandaten ist aufwendig
Daten- aufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> ggf. Nachfrageberechnung für Reisezeiten im MIV Höhenprofil mit Steigungen und Gefällestrecken 	<ul style="list-style-type: none"> umfangreiches lokales Wissen notwendig Vereinigung von Bus- und Bahnnetzen
Daten- aktualisierung	<ul style="list-style-type: none"> regional/punktuell bei wesentlichen Streckenänderungen (Sperrungen, Neubauten) 	<ul style="list-style-type: none"> jährlich zum Fahrplanwechsel teilweise unterjährige Anpassungen
Routing- verfahren	<ul style="list-style-type: none"> einfaches Routing in einem ungerichteten Graphen 	<ul style="list-style-type: none"> Intermodalität: Verknüpfung von IV und des ÖV Routing im Fahrplan
Raum- widerstände	<ul style="list-style-type: none"> Reisezeit als wesentlicher Raumwiderstand Berücksichtigung der Bereitstellung (Parken, Abstellen etc.) ist sehr aufwendig 	<ul style="list-style-type: none"> Reisezeit, Umsteigehäufigkeit, Bedienhäufigkeit und Fahrpreis als relevante Widerstandsfaktoren hoher Aufwand bei der Datenbereitstellung und Berechnung
Aufbereitung und Darstellung	<ul style="list-style-type: none"> Darstellung einfacher Isochronen flächenhafte Ausdehnung mit geringer Inselbildung 	<ul style="list-style-type: none"> Darstellung zahlreicher Indikatoren, schwierige Verknüpfung starke Inselbildung Flächenausdehnung abhängig von der Lage der Haltestellen
Kontextualität	<ul style="list-style-type: none"> geringes Kontextwissen erforderlich, gute Interpretierbarkeit einfacher Indikatoren hohe (MIV) bzw. geringe (NMIV) zeitliche Variation im Tagesverlauf 	<ul style="list-style-type: none"> hohes Kontextwissen notwendig, Fehlinterpretationen sind möglich Erreichbarkeit als Synthese unterschiedlicher Raumwiderstände hohe Zeitabhängigkeit

* General Transit Feed Specification (vgl. Abschnitt 2.3.3.4)

Quelle: eigene Darstellung

Verfahren angewendet, im ÖV erfolgt grundsätzlich eine Zweiteilung, da die Haltestellenanbindung im Individualverkehr erfolgt. Das Routingverfahren muss außerdem in der Lage sein, Fahrplandaten zu interpretieren sowie Umsteige- und Bedienhäufigkeiten auszugeben. Zudem erschweren die unterschiedlichen Raumwiderstände auf ÖV- Wegen die Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Die Synthese aus Reisezeiten, Umstiegen, Bedienhäufigkeiten und Fahrpreisen manifestiert die Erreichbarkeit im ÖV und erfordert ein umfangreiches Kontextwissen. Hinzu kommt, dass diese im Tagesverlauf großen Schwankungen unterworfen sind.

1.3 Erreichbarkeitsinstrumente und ihre Integration in die Planungspraxis

Die Planungspraxis ist ein Gebiet, dessen Handlungen eine wenigstens mittelbare Außenwirkung entfalten. Dies sind insbesondere die mit hoheitlichen Aufgaben betrauten Planungsbehörden, aber auch die von ihnen beauftragten Planungsbüros. Zwar können auch Unternehmen Entscheidungen treffen die sich direkt auf die Erreichbarkeit auswirken, in der Regel werden jedoch hoheitliche Aufgaben adressiert.

Die Rolle von Erreichbarkeitsinstrumenten in der Planungspraxis ist paradox. Eigentlich müssten sie aufgrund der Allgegenwärtigkeit von Erreichbarkeiten in unterschiedlichen planerischen Zusammenhängen sowie ihrer, gerade im Vergleich zu Verkehrsmodellen deutlich geringeren Komplexität, als klassisches räumliches Planungsinstrument etabliert sein. Die Realität steht dieser Einschätzung jedoch entgegen. Zwar werden unter anderem in der Nahverkehrs- und Landesplanung immer wieder Erreichbarkeitsberechnungen durchgeführt, doch aufgrund unterschiedlicher Detaillierungen sowie einer fehlenden Formalisierung sind diese zumeist nicht vergleichbar. Zudem handelt es sich in der Regel um Einzelfalluntersuchungen, die nicht auf verstetigten Erreichbarkeitsmodellen basieren.

1.3.1 Praxisintegration und implementation gap

Seit rund fünfzehn Jahren gibt es eine wissenschaftliche Diskussion zur Erforschung der als implementation gap bezeichneten Lücke zwischen der Entwicklung und Anwendung von Erreichbarkeitsmodellen

(te Brömmelstroet *et al.* 2014; te Brömmelstroet & Bertolini 2008; Vonk *et al.* 2005). In dieser Debatte werden Gründe identifiziert und diskutiert, die die Praxisintegration von Erreichbarkeitsmodellen und -indikatoren bisher verhindern. Zudem werden Lösungsansätze skizziert, die die zukünftige Verwendung fördern können.

Erreichbarkeitsanalysen können sowohl in der Wissenschaft als auch in der Planungspraxis eingesetzt werden. Im wissenschaftlichen Kontext dienen sie unter anderem der Identifikation sozialer Ausgrenzung (Preston & Rajé 2007; Social Exclusion Unit 2003) oder zur Eingrenzung der von hohen Mobilitätskosten betroffenen Haushalte (Büttner 2016; El-Geneidy *et al.* 2016). Es existieren unterschiedlichste Erreichbarkeitsmodelle, die sich sowohl hinsichtlich der räumlichen Auflösung, der Art der Widerstandsberechnung als auch der verwendeten Indikatoren unterscheiden (vgl. Kapitel 8: Anhang). Hinzu kommt, dass die etablierten Modellansätze ihren Ursprung zumeist in wissenschaftlichen Arbeiten haben.

Da Erreichbarkeitsmodelle zumeist in der Wissenschaft entwickelt werden, ist ein Wissenstransfer in die Planungspraxis unerlässlich. Austausch und Transfer werden unter dem Stichwort der Praxisintegration zusammengefasst. Es geht also darum, in der Wissenschaft entwickelte Instrumente in konkreten Planungszusammenhängen zur Anwendung zu bringen. Hier sind zwei weitere Anwendungsfelder zu unterscheiden. Ein Anwendungsfeld sind konkrete Planungsfälle, in denen mitunter auf formalisierte Abläufe oder Mindeststandards zurückgegriffen werden kann. Zu diesen zählen u. a. Standortentscheidungen von öffentlichen Einrichtungen, Variantenvergleiche bei Infrastrukturvorhaben oder die Identifikation von Angebotslücken zur Weiterentwicklung des ÖPNV-Angebotes. Erreichbarkeitsanalysen können aber auch einen eher informativen Charakter aufweisen. So werden in den bundesweiten Raumordnungsberichten Erreichbarkeitskarten dargestellt, um die Möglichkeiten zur Ortsveränderung in unterschiedlichen Räumen zu vergleichen (BBR 2005, S. 17; BBSR 2012; BBSR 2017). Auch die Erreichbarkeitsprojekte der Metropolregionen Hamburg und München dienen eher der Informationsbereitstellung (Peter & Gertz 2017; Wulfhorst *et al.* 2010). Die Bereitstellung von Rauminformationen ist jedoch noch keine echte Planung, sondern eine Erweiterung der Informationsbasis

für unterschiedliche Planungen. Die Praxisintegration von Erreichbarkeitsinstrumenten bedeutet also nicht zwangsläufig ihre Verwendung als echtes Planungswerkzeug.

1.3.2 Gründe für die implementation gap

Die Diskussion um die fehlende Praxisintegration liefert wichtige Erkenntnisse für den Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen und Erreichbarkeitsindikatoren. Wie im Abschnitt 1.3.1 ausgeführt, können Erreichbarkeitsanalysen sowohl für konkrete Planungsfälle, als auch zur Gewinnung allgemeiner Rauminformationen eingesetzt werden. Bei der Integration in die Planungspraxis müssen aber noch zwei weitere Ebenen auseinandergehalten werden. Dies sind die Nutzbarkeit (usability) und der Nutzen (usefulness) von Erreichbarkeitsanalysen (Silva *et al.* 2017b; te Brömmelstroet *et al.* 2014; te Brömmelstroet *et al.* 2016).

Nutzbarkeit und Nutzen von Erreichbarkeitsinstrumenten

Im Zuge der COST Action TU1002⁶ »*Accessibility Instruments for Planning Practice in Europe*« wurden in den Jahren 2012 und 2013 Workshops in 17 Städten durchgeführt, um Hindernisse zu identifizieren, die einer Praxisnutzung von Erreichbarkeitsmodellen entgegenstehen (Hull *et al.* 2012; te Brömmelstroet *et al.* 2014). Diese Hindernisse werden primär über die Nutzbarkeit und den Nutzen von Erreichbarkeitsinstrumenten (accessibility instruments) adressiert.

Die Nutzbarkeit wird über den Grad des erwarteten Aufwandes beim Einsatz von Erreichbarkeitsinstrumenten definiert (te Brömmelstroet *et al.* 2016, S. 1179). Der einfache und intuitive Gebrauch von Erreichbarkeitsinstrumenten hängt außerdem von den Vorkenntnissen der potenziellen Anwender ab. Nach te Brömmelstroet *et al.* wird die Nutzbarkeit unter anderem von der Rechenzeit, der Flexibilität, der Interaktivität und der Nutzerfreundlichkeit beeinflusst (ebd., S. 1179). Der Nutzen beschreibt indes den zusätzlichen Wert, den ein Erreichbarkeitsinstrument für eine bestimmte Planungsaufgabe liefert (ebd., S. 1180). Der Nutzen nimmt beispielsweise zu, wenn ein solches Instrument die

6 COST (European Cooperation in Science and Technology):
<http://www.accessibilityplanning.eu/reports/> (letzter Zugriff: 12.06.2019)

Problemdurchdringung verbessert, eine gemeinsame Sprachgrundlage liefert, die Kommunikation vereinfacht oder die Effizienz einer Arbeitsgruppe erhöht (ebd., S. 1180). Es ist also zu erwarten, dass sich ein hoher Nutzen auch in planerischen Entscheidungen niederschlägt.

Obwohl die Nutzbarkeit und der Nutzen auch von den genutzten Indikatoren, Verkehrsmodi und räumlichen Auflösungen abhängen, können keine eindeutigen Empfehlungen für eine verbesserte Praxisintegration gegeben werden. So sind beispielsweise keine wesentlichen Einschränkungen in der Nutzbarkeit nachzuweisen, wenn vergleichsweise komplexe Gravitations- oder synthetische Erreichbarkeitsindikatoren verwendet werden (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Es wird jedoch unterstrichen, dass einzelne Indikatoren die erforderlichen Rechenzeiten wesentlich erhöhen und damit die Möglichkeit beschränken, Echtzeitberechnungen durchzuführen (ebd., S. 1185).

Silva *et al.* (2017a) führten im gleichen Projektkontext eine Befragung von 80 Entwicklern und möglichen Praxisanwendern von 24 Erreichbarkeitsinstrumenten durch. Sie zeigten, dass die Qualität der Daten und Auswertungen sowie die Art ihrer Darstellung als sehr gut bewertet werden. Hingegen sehen die Entwickler erhebliche Einschränkungen bei der Möglichkeit zur Echtzeitberechnung, der Berechnungsgeschwindigkeit und den erforderlichen Vorkenntnissen (ebd., S. 139). Der Nutzen wird also nicht infrage gestellt, sehr wohl aber die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen. Dies unterstreichen auch Ergebnisse, die den Nutzen der untersuchten Instrumente sowohl in den Bereichen der Landnutzung als auch Verkehrsplanung grundsätzlich hervorheben. Häufig führen aber die organisatorische Trennung zwischen Raum- und Verkehrsplanung, die fehlende Tradition im Bereich der Erreichbarkeitsanalyse (planning culture) und die häufig nicht vorhandene Formalisierung von Erreichbarkeitskennwerten zu einer begrenzten Nutzung (ebd. S. 142ff.).

Das Zusammenspiel zwischen Erreichbarkeitsmodell und praktischer Anwendung

Aufbau und Pflege von Erreichbarkeitsmodellen sind unerlässlich, um Erreichbarkeitsanalysen in der täglichen Arbeit durchführen zu können. Folglich hängt die Praxisintegration von Erreichbarkeitsinstrumenten

auch davon ab, welche Anforderungen der Umgang mit diesen Modellen erzeugt. Zumal zwischen den geforderten Funktionalitäten und der Modellarchitektur eine enge Verbindung besteht. Ein Beispiel ist der Mangel an Echtzeitberechnungen (Levine *et al.* 2017; Silva *et al.* 2017a). Nur wenige Ansätze wurden bisher realisiert, die überhaupt diese Möglichkeit bieten (te Brömmelstroet *et al.* 2016, S. 1181ff.). Die Umsetzbarkeit von Echtzeitberechnungen wird jedoch mit einer zunehmenden räumlichen Auflösung und einer steigenden Detaillierung der Wege reduziert. Auch darum ist es wichtig, den Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen in den Fokus zu rücken. Wie Silva *et al.* (2017, S. 139) betonen, sehen Entwickler umfassende Möglichkeiten, um durch Vereinfachungen zu einer Reduzierung der Rechenzeiten und einer Minderung des notwendigen Expertenwissens zu gelangen.

Eine deutlich stärkere Fokussierung auf die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen auch im wissenschaftlichen Kontext ist also geboten. In diesem Zusammenhang wird bemängelt, dass in der Wissenschaft Erreichbarkeitsinstrumente mit einer hohen Genauigkeit entwickelt, diese in der Praxis aber als nicht ausreichend relevant und handhabbar wahrgenommen werden (Silva *et al.* 2017a). Diese Lücke zwischen der wissenschaftlichen Präzision und praktischen Zweckdienlichkeit wird auch als ›rigor-relevance dilemma‹ bezeichnet (Silva 2008, S. 74; Vonk *et al.* 2005). Demnach werden von Entwicklern sehr genaue Tools entworfen, diese jedoch gleichzeitig als zu komplex, abstrakt, allgemein und unflexibel wahrgenommen. Es wird betont, dass die produzierten Werkzeuge den abstrakten Vorstellungen hinsichtlich des Verkehrs- und Landnutzungssystems folgen, an konkreten Planungsfragen aber vorbeigehen. Auf der anderen Seite stellen Praxisakteure unrealistisch hohe Erwartungen an Erreichbarkeitstools. Die Enttäuschung dieser Erwartungen kann dann zu einer ablehnenden Haltung führen (Silva *et al.* 2017a, S. 136).

Interessant ist zudem, dass die Entwickler von Erreichbarkeitsinstrumenten diesen zumeist eine hohe Qualität hinsichtlich der Genauigkeit, der genutzten Datengrundlagen und der Ergebnisdarstellung zuschreiben. Gleichzeitig stellt ihre Berechnung erhebliche Anforderungen an die IT und erfordert zudem umfassende Daten und ein hohes Expertenwissen. Hinzu kommt die Herausforderung, Erreichbarkeitsinstrumente flexibel auf konkrete Situationen anzuwenden und damit

unterschiedliche Szenarien durchzuspielen (ebd., S. 139). Schlussendlich steht die zusätzliche Kleinräumigkeit im Widerspruch zur angestrebten Flexibilität und der Möglichkeit zur Echtzeitberechnung (ebd., S. 143). Zu einer ähnlichen Einschätzung gelangen auch Boisjoly & El-Geneidy (2017b, S. 33). Sie haben 343 potenzielle Anwender von Erreichbarkeitsanalysen in der praktischen Anwendung befragt und dabei fehlende Daten und mangelndes Expertenwissen als die wesentlichen Nutzungsbarrieren identifiziert (ebd., S. 37). Die Anforderungen sind auch deswegen besonders hoch, da der ÖV der mit Abstand am häufigsten berücksichtigte Modus ist (ebd., S. 40).

Nichttechnische Gründe

Es existieren noch weitere Gründe, die den Einsatz von Erreichbarkeitsanalysen in der Planung erschweren. Diese werden hier als nichttechnische Gründe bezeichnet, da sie den Modellaufbau und die Eigenschaften von Erreichbarkeitsinstrumenten nur indirekt betreffen, also keine Domäne der Modellentwickler sind.

Silva *et al.* (2017, S. 143) nennen die bisher nur selten erfolgte Festschreibung von Erreichbarkeitsanalysen und Erreichbarkeitskennwerten in formalisierten Planungsabläufen als zentrales Hemmnis. Auch Boisjoly & El-Geneidy (2017b, Tab. 1, S. 4off.) weisen darauf hin, dass Erreichbarkeit als qualitatives Merkmal in Planungsdokumenten einerseits häufig auftauchen, die Nennung konkreter Ziele und Kennwerte aber andererseits nicht üblich ist. Von 42 untersuchten Verkehrsentwicklungsplänen (transportation plans) in den USA ließen sich 20% über komplexe Erreichbarkeitsindikatoren evaluieren (Proffitt *et al.* 2019, S. 184). Bemängelt wird außerdem, dass die Beweglichkeit und nicht die Erreichbarkeit das übergeordnete Ziel öffentlicher Planung darstellt (Boisjoly & El-Geneidy 2017b, S. 34, 40; Silva *et al.* 2017a, S. 143). Die Beweglichkeit steigt mit der Reduzierung der Raumwiderstände. Gleichzeitig sagt sie jedoch nichts darüber aus, welchen Verkehrszwecken diese Reduzierung dient. So ist es nicht verwunderlich, dass Erreichbarkeitsinstrumente eher aufgrund einer individuellen Motivation und auf freiwilliger Basis angewendet werden (Boisjoly & El-Geneidy 2017b, S. 37).

1.3.3 Ansätze zur Überbrückung der implementation gap

In der Vergangenheit wurden Hemmnisse und Maßnahmen diskutiert, um eine ihrer Bedeutung gemäße Integration von Erreichbarkeitsinstrumenten in die Praxis zu erzielen. Dabei ist ein enger Austausch zwischen Modellanwendern und Entwicklern essentiell, da Erreichbarkeiten mittlerweile Gegenstand eines etablierten und ausdifferenzierten Forschungsfeldes sind (Boisjoly & El-Geneidy 2017b, S. 41). Gefordert wird außerdem die Abkehr von einer auf Präzision ausgerichteten Weiterentwicklung von Erreichbarkeitsindikatoren. Vielmehr soll sich der Fokus auf die Nutzbarkeit richten und dennoch eine hohe Genauigkeit der Erreichbarkeitsmodelle gewährleistet bleiben (Silva *et al.* 2017a, S. 143). Dies betrifft insbesondere Modelle mit einer regionalen Ausrichtung, da die eingeschränkte Datenverfügbarkeit und die langen Rechenzeiten die Nutzbarkeit dieser Modelle reduzieren. Auch stellen regionale Erreichbarkeitsmodelle die Entwickler und Anwender hinsichtlich der Verstetigung vor erhebliche Herausforderungen. Als Verstetigung wird die dauerhafte Verwendung und Aktualisierung eines Erreichbarkeitsmodells für unterschiedliche Planungsaufgaben verstanden. Zwar zielt dies zumeist auf die dauerhafte Verwendung durch eher nichttechnische Mitarbeiter in der öffentlichen Planung, gleichwohl gilt dies in geringerem Ausmaß auch für wissenschaftliche Einrichtungen und privatwirtschaftliche Planungsbüros. Laut Owen & Levinson (2012, S. 41ff.) sollte eine einheitliche, nur selten veränderte Datenstruktur verwendet werden. Außerdem sollten primär die Indikatoren und nicht das Modell im Vordergrund stehen. Diese Indikatoren müssen zudem schnell und mit einem möglichst geringen Vorwissen und einem überschaubaren technischen Aufwand zu berechnen sein.

Die Datenverfügbarkeit und Widerstandsberechnung sollte aufgrund der hohen Bedeutung gerade für öffentliche Verkehre verbessert werden (Boisjoly & El-Geneidy 2017b, S. 40). Anwender und Entwickler haben jedoch nur einen geringen Einfluss auf die Datenbereitstellung. Auch ist nicht absehbar, ob und wann neue Programme bereitgestellt werden, die die Widerstandsberechnung mit einem geringen Expertenwissen ermöglichen.

Als ein weiterer wesentlicher Baustein zur Überbrückung der implementation gap gilt die Verwendung von Erreichbarkeitsanalysen und Erreichbarkeitskennzahlen in formellen Planungsabläufen. Erreichbarkeiten können in Raumordnungs-, Nahverkehrs- und Verkehrsentwicklungsplänen aber auch in Stellplatzsatzungen und Wohnstandortplanungen Berücksichtigung finden. Zu nennen sind die Abgrenzung der Kongruenzräume zentraler Orte, die Definition von Bedienstandards in der Daseinsvorsorge oder die Berücksichtigung des ÖPNV-Angebotes bei der Festschreibung des Stellplatzbedarfes. Eine solche Formalisierung würde jedoch den Einsatz von Erreichbarkeitsinstrumenten in der Planungspraxis erfordern. Zu nennen sind hier Nahverkehrs- und Verkehrsentwicklungspläne, die in Teilen auf Erreichbarkeitskennwerte zurückgreifen (Schäffer 2018; Winter 2005). Hervorzuheben ist außerdem die formalisierte Erreichbarkeitsplanung im Rahmen der englischen LTP (Department for Transport 2004; Halden 2009; Halden 2014). Aber auch in den USA wurden unterschiedliche Modelle entwickelt, um die öffentliche Planung zu unterstützen (Bhat *et al.* 2006; Owen & Levinson 2012) und Erreichbarkeitsunterschiede zwischen Städten und Regionen sichtbar zu machen (Owen *et al.* 2017).

1.4 Beispiele für regionale Erreichbarkeitsmodelle

Wie bereits in Abschnitt 1.3 ausgeführt, ist zwischen der Verwendung von Erreichbarkeitsanalysen als Informationswerkzeug und als Planungswerkzeug zu unterscheiden. Die Verwendung als Informationswerkzeug berührt den Bereich der informellen Planung mit einer geringen Selbstbindungswirkung (ARL o.J.a). Diese ist in ihrem »Ablauf nicht bzw. nicht in der Genauigkeit geregelt, wie die formelle Planung« (Stellmacher 2010, S. 8). Zu ihren Instrumenten gehören u. a. die Raumbbeobachtung und die Erstellung von Leitbildern zur räumlichen Entwicklung (ARL o.J.a). Formelle Planungsinstrumente sind hingegen gesetzlich verankert und besitzen eine rechtliche Bindungswirkung (Stellmacher 2010, S. 5). Ihnen sind auch Nahverkehrspläne zuzurechnen (vgl. Kapitel 4), wenngleich diese keine unmittelbare Außenwirkung entfalten. Entscheidend ist, dass die formelle Planung unmittelbar darauf ausgerichtet ist, Entscheidungen zu treffen und damit letztlich wirksam zu werden.

Tabelle 4: Beispiele für Erreichbarkeitsanalysen als Informationswerkzeug

Beispiel	Gebiet	Auflösung	Verkehrsgraph
<p>Österreichische Raumordnungskonferenz (ÖROK)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plattform »Raumordnung & Verkehr« • Erreichbarkeitsverhältnisse in Österreich 	Österreich	<p>Raumbezugssystem: Raster (100-Meter (bewohnt), 500-Meter, 1-Kilometer)</p> <p>Gelegenheiten: Regionale und überregionale Zentren</p>	<p>MIV: mit ArcGIS, unbelastetes Netz</p> <p>ÖV: PTV Visum, intermodale Wege mit realen Fahrplandaten, inkl. Haltestellenanbindung</p> <p>NMIV: wenn schneller als ÖV</p>
<p>Erreichbarkeitsmodell des BBSR</p> <ul style="list-style-type: none"> • Raumordnungsberichte • Verkehrsbild Deutschland 	Deutschland	<p>Raumbezugssystem: Gemeinden, Kreise, Raster (5 Kilometer), Verkehrsknoten</p> <p>Gelegenheiten: Zentren, Verkehrsinfrastrukturen (IC-Bahnhöfe, Autobahnanschlüsse etc.)</p>	<p>MIV: mit ArcGIS, unbelastetes Netz</p> <p>ÖV: Fahrplanabfragen, externe Dienstleister</p>
<p>Erreichbarkeitsmodell für das polnische Ministerium für Investitionen und wirtschaftliche Entwicklung</p>	Polen	<p>Raumbezugssystem: NUTS* 3 (~Kreise)</p> <p>Gelegenheiten: Zentren, Krankenhäuser, Arbeitsplätze, Einwohner (jeweils auf Ebene von NUTS 3), Verkehrsknoten</p>	<p>MIV: mit ArcGIS, unbelastetes und relativ dünnes Netz</p> <p>ÖV: einfaches Netz, kein Fahrplan. Geschwindigkeiten auf Linienrouten und Bahnstrecken</p>

* Nomenclature des unités territoriales statistiques

Quelle: eigene Darstellung

1.4.1 Erreichbarkeitsanalysen als Informationswerkzeug

Häufig werden Erreichbarkeitsanalysen als Informationswerkzeug von öffentlichen Einrichtungen eingesetzt, um einen Überblick über Erreichbarkeitsverhältnisse auf regionaler oder nationaler Ebene zu geben. Den formellen Planungsinstrumenten sind sie zumeist nicht zugeordnet, da sie weder rechtlich bindend sind, noch eine unmittelbare rechtliche Außenwirkung entfalten. In Tabelle 4 sind unterschiedliche Beispiele für den Einsatz als Informationswerkzeug – insbesondere zur Raumb Beobachtung und zum Monitoring – aufgeführt. Die einzelnen Beispiele werden hinsichtlich der genutzten Auflösungen und Verkehrsgraphen anschließend näher vorgestellt.

Die Erreichbarkeitsanalysen der Österreichischen Raumordnungskonferenz

In Österreich werden durch die ÖROK (Österreichische Raumordnungskonferenz) regelmäßig Untersuchungen beauftragt, die die Erreichbarkeitsverhältnisse im Bundesgebiet darstellen (im Rahmen der ÖREK-Partnerschaft »Plattform Raumordnung & Verkehr«⁷). Die Konferenz setzt sich zusammen aus Vertretern des Bundes, der Länder und der Gemeinden. Ihre zentralen Aufgaben sind die Raumb Beobachtung und die Erstellung des Österreichischen Raumentwicklungskonzeptes. Bereits seit Ende der 1980er Jahre werden von wechselnden Instituten Erreichbarkeitsanalysen für das Gesamtgebiet Österreichs durchgeführt (Platzer & Purschke 1989). Die aktuellen Analysen wurden unter dem Titel »ÖROK-Erreichbarkeitsanalyse 2018 (Datenbasis 2016)« im Jahre 2018 veröffentlicht (ÖROK 2018). Diese Auswertungen basieren auf einem 100-Meter-Raster mit etwa 570 Tsd. bewohnten Zellen (ÖROK 2018, S. 15). In der Ausgabe von 2005 wurde noch ein Rastermodell mit einer Auflösung von 250-Metern und 268.050 bewohnten Zellen verwendet (ÖROK 2007, S. 13). In beiden Ausgaben stellen regionale und überregionale Zentren sowie übergeordnete Schulstandorte die einzigen Gelegenheitstypen dar. Die Integration von Arbeitsplatzstandorten ist aufgrund der hohen

7 Siehe auch: <https://www.oerok.gv.at/raum-region/oesterreichisches-raumentwicklungskonzept/oerek-2011/oerek-partnerschaften/aktuelle-partnerschaften/roverkehr.html> (letzter Zugriff: 17.04.2019)

methodischen Komplexität und der notwendigen Abstimmungsprozesse bisher nicht erfolgt (ÖROK 2018, S. 17). Es wird also einerseits eine hohe räumliche Auflösung verwendet, andererseits werden zweiseitig nur wenige Gelegenheiten berücksichtigt. Die Analysen werden sowohl für den MIV als auch den ÖV durchgeführt. Wenn Ziele zu Fuß schneller erreicht werden können als mit öffentlichen Verkehrsmitteln, entspricht die Gehzeit der Reisezeit im ÖV. Der Modellierungsansatz ist weitgehend analog zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren. Lediglich auf die Berechnung einer Startwartezeit wird verzichtet. Ziel ist die regelmäßige Aktualisierung, um Veränderungen im Zeitverlauf nachzuvollziehen (Weiss *et al.* 2018, S. 240). In der Vergangenheit erfolgten Erreichbarkeitsberechnungen zumeist in einem Intervall von mindestens zehn Jahren. Das zugrundeliegende Erreichbarkeitsmodell liegt beim österreichischen Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), die Berechnungen werden jedoch von externen Dienstleistern durchgeführt.

Durch das BMVIT wird außerdem ein System zur Berechnung und Darstellung von sieben ÖV-Güteklassen betrieben (Hiess 2017). Diese werden über die Bedienungshäufigkeiten unterschiedlicher Verkehrsmittel und die Haltestellenentfernung für ein bewohntes 100-Meter-Raster bis zu einer Haltestellenentfernung von 1.250 Metern berechnet (ebd., S. 16ff.). Das Erreichbarkeitsmodell beinhaltet rund 37 Tsd. Haltestellen und basiert auf realen und aktuellen Fahrplandaten (Weiss *et al.* 2018, S. 238).

Das Erreichbarkeitsmodell des BBSR

Durch das BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) wird seit einigen Jahren ein Erreichbarkeitsmodell unterhalten, welches primär für die Berechnung von Erreichbarkeitsanalysen der etwa alle fünf Jahre erscheinenden Raumordnungsberichte sowie zur Bewertung von Verkehrsinfrastrukturprojekten eingesetzt wird (BBSR o.J.b; Buthe *et al.* 2018). Die Auswertungen dienen zudem der Raumwirkungsanalyse von Neubauprojekten des Bundesverkehrswegeplans 2030 (Buthe *et al.* 2014). Das Erreichbarkeitsmodell umfasst in seiner höchsten Auflösungsstufe deutschlandweit etwa 516 Tsd. Verkehrsknoten. Geringere Auflösungsebenen sind Gemeinden, Gemeindeverbände und Kreise (BBSR 2019,

S. 14). Es werden außerdem Reisezeiten zu nächsten zentralen Orten auf Haltestellenebene berechnet und visualisiert (Pütz & Schönfelder 2018, S. 16). Die Erreichbarkeitswerte auf Ebene von Verkehrsknoten werden über Interpolationsverfahren in Polygone transferiert. Zielseitig werden insbesondere zentrale Orte und Verkehrsknoten berücksichtigt (BBSR 2017, S. 112ff.).

Für die Bewertung neuer Verkehrsinfrastrukturprojekte und der sich ergebenden Veränderungen wird ein unbelastetes Straßennetz verwendet. Es werden zudem gemittelte Zeitaufschläge unterstellt, die mit den Werten korrespondieren, die bei der Erstellung und Bewertung des BVWP 2030 angelegt wurden. Insgesamt umfasst das Straßennetz 662 Tsd. Strecken (BBSR 2019, S. 61). Die Berechnungen des ÖV werden bisher an einen externen Dienstleister vergeben (BBSR 2019, S. 27; Buthe *et al.* 2018, S. 10). Dieser erstellt eine Widerstandsmatrix auf Basis aktueller Fahrplandaten. Es werden nur Fahrplanfahrten berücksichtigt, die das Netz aus Verkehrsknoten bzw. Haltestellen berühren. Ein flächendeckendes Busangebot ist nicht enthalten. Das Modell ist in der Lage, sowohl die Erschließungs- als auch die Bedienungs- und Verbindungsqualität des ÖPNV zu ermitteln. So werden beispielsweise die Anzahl der Abfahrten an Haltestellen und die Reisezeiten zu Oberzentren dargestellt (Pütz & Schönfelder 2018, S. 6, 11, 12).

Mit dem Ziel einer Weiterentwicklung der Erreichbarkeitsanalysen des BBSR wurden zwischen 2017 und 2018 unterschiedliche Ansätze erarbeitet. Zu diesen gehören die Erweiterung der Strukturdatenbasis um Daseinsvorsorgeeinrichtungen, der Aufbau eines eigenen ÖV-Verkehrsgraphen und die Berücksichtigung von Auf- und Abrüstzeiten im MIV (BBSR 2019, S. 104ff.). Die räumliche Auflösung stand nicht im Fokus der Untersuchung. Gleichwohl wird eine Überarbeitung der angewendeten Interpolationsverfahren empfohlen (ebd., S. 106).

Polen: Ministerium für Investitionen und wirtschaftliche Entwicklung

Spätestens seit der europäischen Osterweiterung im Jahre 2004 erfolgten in Polen umfangreiche Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur und insbesondere in das Straßennetz. Gleichzeitig erfolgten intensive demographische und wirtschaftliche Veränderungsprozesse, die sich auch

räumlich niederschlugen. Zu diesen gehören eine hohe Abwanderung in das westeuropäische Ausland und das gleichzeitige Wachstum einiger polnischer Großstädte. In der Konsequenz verloren gerade die östlichen Gebiete einen erheblichen Teil ihrer Wohnbevölkerung (Stępniaak & Rosik 2018, S. 300). In der Vergangenheit wurden mehrere von der Europäischen Union geförderte Forschungsprojekte durchgeführt, um das Erreichbarkeitsgefälle in Polen zu untersuchen (Komornicki *et al.* 2018; Stępniaak *et al.* 2013; Stępniaak & Jacobs-Crisioni 2017).

Das verwendete Straßennetz besteht aus 12 Tsd. Strecken, die in drei Hierarchiestufen unterteilt sind (Stępniaak *et al.* 2013, S. 82). Berücksichtigt werden zusätzlich unter anderem die Straßenbreite, Tempolimits und die Bevölkerungsdichte im Umkreis. Aus diesen Parametern wird eine möglichst realistische Reisezeit je Strecke abgeleitet. Der ÖPNV ist linienfein implementiert (vgl. Abschnitt 2.3.1). Im Bahnverkehr werden reale Reisezeiten zwischen Knoten berücksichtigt, im Busverkehr eine durchschnittliche Fahrtgeschwindigkeit von 30 km/h. Mit dem Modell werden unter anderem Erreichbarkeitspotenziale für Arbeitsplätze und Einwohner für ganz Polen berechnet (Stępniaak & Rosik 2018, S. 85ff.). Einen Schwerpunkt bildet die Veränderung der Erreichbarkeiten im Zeitverlauf und gerade nach Beitritt zur EU (Stępniaak & Rosik 2018, S. 300). Das Modell ermöglicht es außerdem, Ausbaumaßnahmen des Straßen- und Schienennetzes hinsichtlich des Einflusses auf regionale Erreichbarkeiten zu bewerten (Komornicki *et al.* 2018, S. 23ff.). Erreichbarkeitsanalysen im Bereich der Daseinsvorsorge sind aufgrund der geringen räumlichen Auflösung nicht möglich. Im Unterschied zu den Modellen des BBSR und der ÖROK, handelt es sich um einen weniger aufgelösten Ansatz, welcher sich ausschließlich am ursprünglichen Nutzungszweck orientiert.

Schlussfolgerungen

Die vorgestellten und von Behörden bereitgestellten Erreichbarkeitsmodelle ermöglichen die Erreichbarkeitsberechnung auf Landesebene. Zumeist kommen Reiseaufwandsindikatoren zum Einsatz. Zielseitig werden wenige Gelegenheiten berücksichtigt, insbesondere zentrale Orte und Verkehrsknotenpunkte. Ein dezidierter Einsatz zur Planung der regionalen oder kommunalen Daseinsvorsorge ist nicht möglich. Erstens

fehlen die relevanten Gelegenheiten und zweitens erlaubt die räumliche Auflösung zumeist keine ausreichende räumliche Differenzierung der Reisezeiten. Da also eher Raumwiderstände auf größeren Distanzen im Zentrum stehen, wird auf die Integration des NMIV weitgehend verzichtet. Auch der ÖPNV ist in den vorgestellten Ansätzen nicht in voller Detaillierung enthalten, wenngleich Ansätze für eine weitergehende Integration erkennbar sind. Schon heute ist es auf behördlicher Seite möglich, hochaufgelöste Erreichbarkeiten für unterschiedliche Verkehrsmodi auf nationaler Ebene zu berechnen. Dieses ist jedoch Resultat einer mitunter mehrere Jahrzehnte andauernden inhaltlichen und technischen Auseinandersetzung. Insofern ist hier, beispielsweise in Bezug auf das BBSR, von einer hohen Spezialisierung der Mitarbeiter auszugehen, die so nur in seltenen Fällen für Bundesländer oder Kreise angenommen werden kann. Dementsprechend lassen sich auf bundesbehördlicher Ebene andere und vor allem ambitioniertere Ziele verfolgen, als es auf regionaler Ebene möglich wäre.

1.4.2 Erreichbarkeitsanalysen als Planungswerkzeug

Im Unterschied zur Verwendung als Informationswerkzeug, können Erreichbarkeitsanalysen auch zur Planung und damit zur Entscheidungsfindung eingesetzt werden. Im Abschnitt 1.2.2 wurde bereits herausgearbeitet, dass Planung die »*systematische Abfolge von Handlungen [umfasst], um ein vordefiniertes Ziel zu erreichen*« (Hall & Tewdwr-Jones 2011, S. 3). Erreichbarkeitsanalysen ermöglichen eine auf dieses Ziel ausgerichtete Entscheidungsfindung. Sowohl im Vereinigten Königreich als auch den USA sind Erreichbarkeitsanalysen in einzelnen Bereichen für den Transfer von Bundesmitteln oder die Aufstellung von Verkehrsplänen vorgeschrieben. Die rechtliche Integration von Erreichbarkeitsinstrumenten und die methodische Durchführung der Erreichbarkeitsanalyse werden nachfolgend vorgestellt.

Accessibility planning im Vereinigten Königreich

Im Vereinigten Königreich werden vor allem die Mobilitätsbeschränkungen sozial benachteiligter Personengruppen im Erreichbarkeitskontext diskutiert. Diese Auseinandersetzung wurde maßgeblich durch einen im

Jahre 2003 erschienenen Bericht der britischen Regierung beeinflusst, in dem die soziale Exklusion im Verkehr primär als Erreichbarkeitsdefizit deklariert wird (Social Exclusion Unit 2003). Die folgenden Gründe werden als Ursache für mobilitätsbezogene soziale Exklusion genannt:

»The availability and physical accessibility of transport; the cost of transport; the location of services and opportunities in inaccessible places; people's concerns about safety and security when travelling; and limited travel horizons (people's unwillingness or lack of confidence about travelling beyond a certain distance from home).«

(Kilby & Smith 2012, S. 6; Social Exclusion Unit 2003, S. 17)

Von diesen Untersuchungsergebnissen ausgehend war es das Ziel, durch eine sogenannte Erreichbarkeitsplanung (Accessibility planning) Mobilitätsbeschränkungen zu erkennen und zu reduzieren. Zudem wurde ausdrücklich betont, dass Erreichbarkeitsdefizite kein originäres Handlungsfeld der Verkehrsplanung darstellen, sondern das gemeinsame Vorgehen unterschiedlicher Fachplanungen erfordern. In der unmittelbaren Folge wurden die Landkreise (Counties) seit 2006 verpflichtet, Erreichbarkeitsplanungen in ihren LTP zu berücksichtigen (Hull et al. 2012, S. 29). Durch das britische Verkehrsministerium (Department for Transport) wurde eine detaillierte Erreichbarkeitsrichtlinie entwickelt, um zu einer einheitlichen und vergleichbaren Bewertung der Erreichbarkeitsverhältnisse zu gelangen (Department for Transport 2004). Diese Richtlinie empfiehlt ein fünfstufiges Vorgehen, welches unter anderem die Abbildung des Ist-Zustandes (inkl. öffentlicher Beteiligung), die Erarbeitung eines Aktionsplans sowie das Monitoring von Maßnahmen und Fortschritten umfasst.

In dieser Richtlinie werden außerdem die relevanten Erreichbarkeitsindikatoren aufgeführt (Department for Transport 2004, S. 28ff.). Der Schwerpunkt liegt auf Reiseaufwands- und Kumulationsindikatoren und hier insbesondere auf Arbeitsplätzen und öffentlichen Gesundheits-, Bildungs- und Versorgungseinrichtungen (Reynolds & Department for Transport 2005, S. 12). Diese Indikatoren werden landesweit berechnet und dienen den einzelnen local transport authorities als wichtige Zielgröße (Curl et al. 2011, S. 5). Für die Reiseaufwandsindikatoren der insgesamt acht Aktivitätstypen werden außerdem Zeitgrenzen festgelegt, die den unteren und vor allem oberen Bereich der Zielreisezeiten festlegen.

Mit einer maximalen Reisezeit von 60 Minuten zur nächsten Einrichtung werden Krankenhäusern und weiterführenden Bildungseinrichtungen die längsten Reisezeiten zugestanden (Department for Transport 2014, S. 6). Kumulationsindikatoren werden in erster Linie für das Angebot an Arbeitsplätzen und die Wohnorte der Bevölkerung ermittelt. Diese sind zwar in einer großen Zahl vorhanden, zur Modellvereinfachung jedoch auf Ebene statistischer Einheiten ($n = 32.482$) aggregiert (ebd., S. 7). Es wird vorgeschlagen, alle Erreichbarkeitsindikatoren auf Basis von statistischen Einheiten mit durchschnittlich 1.500 Einwohnern zu berechnen. In der ersten Phase der LTP verfügte das Vereinigte Königreich über 32.482 dieser Einheiten (ebd., S. 2). Außerdem werden zentrale Datensätze mit Verkehrsnetz- und Verbindungsdaten zur Verfügung gestellt. Die Daten des ÖPNV umfassen alle regulären Fahrplanfahrten in einem festgelegten Monat. Flexible Bedienformen und Schülerverkehre sind nicht enthalten (ebd., S. 11).

Unter dem Namen Accession⁸ wurde frühzeitig ein Tool entwickelt, welches die local transport authorities in die Lage versetzen sollte, Erreichbarkeitsindikatoren für ihr jeweiliges Zuständigkeitsgebiet zu ermitteln (Reynolds & Department for Transport 2005, S. 23). Erste Auswertungen zeigen, dass von nahezu allen Verwaltungen die Software Accession eingesetzt wurde, um Erreichbarkeiten im jeweiligen Hoheitsgebiet zu berechnen. Gleichwohl wurden zahlreiche Restriktionen bemängelt. Zu diesen gehören die fehlende Bearbeitungsmöglichkeit von Verkehrsnetzen sowie die Verwendung eigener räumlicher Auflösungen und Strukturdaten (Curl *et al.* 2011, S. 7ff.). Auch das flächendeckende MIV-Netz wird als lückenhaft bezeichnet und Angaben der Reisekosten fehlen völlig (Halden 2009, S. 8).

Die erste Periode der LTP nach Erscheinen der Erreichbarkeitsrichtlinie lief von 2006 bis 2011. Eine Fortführung der Erreichbarkeitsrichtlinie in den seit 2011 gültigen LTP erfolgte aber nicht. Im Gegenzug wurde eine *inklusive Mobilitätsstrategie* verankert, die sich nicht ausschließlich

8 Diese Software wurde ursprünglich von Citilabs für den Einsatz in Großbritannien entwickelt. Nach Übernahme von Citilabs durch ESRI wurde Accession in den neuen Dienst Sugar (Sugar Access) integriert (<http://www.citilabs.com/software/sugar/>, letzter Zugriff: 26.06.2019).

auf den Verkehrssektor konzentriert.⁹ Aufgrund des umfassenden Einsatzes von Erreichbarkeitsanalysen in der Planungspraxis sind die LTP dennoch eines der meist erforschten Einsatzgebiete (Hull *et al.* 2012, S. 29). Es fehlen jedoch Erfahrungsberichte hinsichtlich der Softwareanwendung und der Nutzung durch die Planer in der täglichen Praxis.

Service equity analysis in den USA

Metropolitan planning organisations (MPO) sind in den USA hauptverantwortlich für die regionale Verkehrsplanung. Diese erstellen für ihre Planungsräume regionale Verkehrspläne (RTP), um die langfristige und strategische Entwicklung des Verkehrssystems abzusichern. Die RTP haben eine Laufzeit von rund 20 bis 30 Jahren und sind in der Regel nicht bindend. Sie sind aber eine Voraussetzung für den Einsatz von Bundesmitteln bei Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur (Proffitt *et al.* 2019, S. 167ff.). In den RTP werden Ziele formuliert und Kennwerte abgeleitet, die der Verbesserung des Verkehrsangebotes dienen. In diesem Zusammenhang können Erreichbarkeitsanalysen die MPO bei der Festlegung von Investitionsentscheidungen unterstützen (ebd., S. 170). In einer vergleichenden Untersuchung wurden 42 RTP (von landesweit 394 MPO) ausgewählt, um den Umgang mit Erreichbarkeitskriterien zu untersuchen (ebd.).

Laut dieser Untersuchung wird Erreichbarkeit nur in wenigen RTP explizit definiert und in weniger als der Hälfte dieser Pläne werden Ziele oder Maßnahmen mit einem klaren Erreichbarkeitsbezug festgelegt. Ausdrücklich wird zudem auf die Lücke zwischen wissenschaftlicher Theorie und planerischer Praxis hingewiesen (ebd., S. 184ff.). Wenn Erreichbarkeit adressiert wird, dann häufig als bloße Zugangsmöglichkeit zum öffentlichen Verkehrssystem. Etwa 20% aller RTP beinhalten Indikatoren, die die Summe erreichbarer Arbeitsplätze oder anderer Ziele aufführen. Insgesamt werden in 53% der untersuchten Pläne Erreichbarkeitsindikatoren verwendet, die die Verbindung zwischen dem Landnutzungs- und dem Verkehrssystem bewerten (ebd., S. 185). Zu

9 <https://www.gov.uk/government/publications/inclusive-transport-strategy/the-inclusive-transport-strategy-achieving-equal-access-for-disabled-people> (letzter Zugriff: 21.01.2020)

ähnlichen Ergebnissen kommen auch Boisjoly & El-Geneidy (2017a), die den Umgang mit Erreichbarkeiten in weltweit 32 Verkehrsplänen (davon 18 RTP) untersucht haben. Laut ihnen werden in 14 von 18 RTP Erreichbarkeiten adressiert und in 11 Plänen Kennzahlen formuliert. Eine Berechnung dieser wurde von 9 MPO für den jeweiligen Planungsraum durchgeführt (ebd., S. 40ff.). Wie bereits für das Vereinigte Königreich gezeigt, ist die Exklusion sozial benachteiligter Personengruppen auch in den USA ein Treiber für den Umgang mit Erreichbarkeit. So sind Gebietskörperschaften und öffentliche Einrichtungen mit über 200 Tsd. Einwohnern (u.a. MPO) dazu verpflichtet, die Auswirkungen von wesentlichen Angebotsveränderungen im ÖPNV auf einzelne Bevölkerungsgruppen beim Einsatz von Bundesmitteln zu bewerten. Bemängelt wird jedoch, dass für diese Bewertungen bisher keine Standards existieren (Karner 2018, S. 24, 25).

Untersuchungsergebnisse zeigen, dass vor allem größere MPO Erreichbarkeiten als ein wesentliches Kriterium in ihrem RTP verankern. Ein möglicher Grund sind die umfassenderen Planungskapazitäten (Proffitt *et al.* 2019, S. 184ff.). So wurde bereits in anderen Untersuchungen deutlich, dass die Mitarbeiterzahl und die finanzielle Ausstattung von Verwaltungen einen erheblichen Einfluss auf die Güte und Komplexität von Planungen hat (Brody *et al.* 2004). Gleichwohl wird die relativ seltene oder nachrangige Berücksichtigung von Erreichbarkeitskenngrößen auch mit einer zumeist auf die Erhöhung der Straßenkapazitäten ausgerichteten Planung begründet (Proffitt *et al.* 2019, S. 187).

Schlussfolgerungen

Es zeigt sich, dass auf internationaler Ebene kein einheitliches Bild hinsichtlich der Durchdringung der regionalen Verkehrsplanung mit Erreichbarkeitskriterien gezeichnet werden kann. Auffällig ist jedoch, dass sowohl im Vereinigten Königreich als auch den USA die soziale Exklusion den wesentlichen Treiber für den Umgang mit Erreichbarkeiten darstellt. Dabei wird den regionalen Verwaltungen jeweils durch die Bundesebene vorgegeben, Erreichbarkeitsanalysen einzusetzen, um die soziale Ungleichbehandlung zu reduzieren. Erreichbarkeiten werden also insbesondere dort eingesetzt, wo Bundesbehörden, beispielsweise bei der Bereitstellung von Fördergeldern, dies erfordern.

Im Vereinigten Königreich hat bereits eine wesentlich umfangreichere Durchdringung stattgefunden. In den regionalen Verkehrsplänen werden Erreichbarkeiten routinemäßig analysiert und dargestellt. Mit Accession wurde den Verantwortlichen eine Software bereitgestellt, die die Erreichbarkeitsberechnung ermöglicht. Hinzu kommen bundeseinheitliche Datensätze der Strukturdaten und des Verkehrsangebotes. Erkennbar ist eine starke Zentralisierung und Standardisierung, die sich in den USA und in Deutschland so bisher nicht beobachten lässt.

In den USA werden Erreichbarkeitsinstrumente ebenfalls im Rahmen der regionalen Verkehrsplanung eingesetzt. Gleichwohl werden nur etwa in der Hälfte der untersuchten RTP Erreichbarkeiten adressiert und Erreichbarkeitsindikatoren benannt. Auch ihre Ausgestaltung ist höchst unterschiedlich und die Berechnung wird von den regionalen Verwaltungen in Eigenregie durchgeführt oder beauftragt. Insofern lässt sich beispielsweise die deutsche Nahverkehrsplanung eher mit dem Beispiel der USA vergleichen, da auch sie nur eine geringe Zentralisierung in der Ausarbeitung und Standardisierung der Inhalte aufweist (vgl. Kapitel 4).

1.5 Zwischenfazit: Erreichbarkeitsanalysen in der Planungspraxis

Die vorangegangenen Kapitel widmen sich den Möglichkeiten und Grenzen einer Verwendung von Erreichbarkeitsanalysen in der Planungspraxis. Dieser Diskussion liegt der Standpunkt zugrunde, dass Erreichbarkeit eine wesentliche Zielgröße in der Verkehrs- und Raumplanung darstellt. Die geringe Anwendung von Erreichbarkeitsmodellen in der Planungspraxis steht dieser Einschätzung jedoch entgegen.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen lassen nicht darauf schließen, dass die Integration aufgrund fehlender Erreichbarkeitsindikatoren oder ungeeigneter Darstellungen und Auswertungen scheitert (te Brömmelstroet *et al.* 2016, S. 1186ff.). Diese Einschätzung basiert auf Fallbeispielen mit unterschiedlichen Fragestellungen, Indikatoren, räumlichen Auflösungen und Darstellungen. Vielmehr basiert die implementation gap auf einer begrenzten Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen sowie der geringen Verankerung von Erreichbarkeitskriterien in formellen Planungsabläufen (Silva *et al.* 2017a, S. 143; Silva

& Larsson 2018, S. 8). In Deutschland kann die Debatte um (Mindest-) Standards in der Daseinsvorsorge in diesen Kontext eingeordnet werden, da es sich letztlich um Erreichbarkeitsstandards handelt (BMVBS 2010d; Burgdorf *et al.* 2015). Diese Debatte liegt jedoch außerhalb der eigentlichen Auseinandersetzung mit Erreichbarkeitsmodellen und -indikatoren, mitunter wird jedoch auch auf die fehlende Standardisierung von Erreichbarkeitsmodellen und Erreichbarkeitsuntersuchungen verwiesen (Miller 2018, S. 554).

Zwar wird immer wieder die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsinstrumenten untersucht, damit wird jedoch zumeist die Möglichkeit verstanden, Erreichbarkeitswerte richtig zu interpretieren und auf konkrete Fragestellungen anzuwenden (te Brömmelstroet *et al.* 2016). Die Nutzbarkeit beginnt jedoch schon bei der Modellentwicklung, dem Aufbau, der Anwendung und der Verstetigung. Zwar geben (potenzielle) Praxisanwender in der Regel an, mit dem Konzept von Erreichbarkeit vertraut zu sein (Boisjoly & El-Geneidy 2017a, S. 33), dies allein reicht jedoch nicht, um entsprechende Modelle überhaupt adäquat zu nutzen. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Vergleich mit den ungleich komplexeren Verkehrsmodellen. Ihre Anwendung kann im Rahmen der Verkehrsplanung als etabliert bezeichnet werden und dies, obwohl sie in der Regel hohe personelle und finanzielle Ressourcen erfordern. Diese Ressourcen stehen jedoch in einem angemessenen Verhältnis zum (finanziellen) Aufgabenumfang. So werden große Infrastrukturprojekte mit Hilfe von Verkehrsmodellen der standardisierten Bewertung unterzogen. Auch werden Verkehrsmodelle häufig eingesetzt, um beispielsweise das ÖPNV-Angebot in Großstädten zu verbessern oder CO₂- und NO_x-Emissionen lokal zu reduzieren.

Da Erreichbarkeitsmodelle auch zur Bewertung einfacher Maßnahmen eingesetzt werden können, dürfen sie keine unverhältnismäßig hohen Kosten produzieren (BMVI 2016, S. 40). Insofern ist es widersprüchlich, Erreichbarkeitsanalysen für kleine Maßnahmen durchzuführen, die Modelle aber andererseits immer detaillierter und komplexer aufzubauen. Ein möglicher Ansatz ist die Verwendung regionaler Modelle, welche, dem Subsidiaritätsprinzip folgend, von kreisübergreifenden Institutionen aufgebaut und anschließend allen Gebietskörperschaften zur Verfügung gestellt werden. Daraus resultiert die konsequente

Hinwendung zu regionalen Modellen, welche sich zukünftig vermutlich fortsetzen wird. Ein Beispiel für eine solche Kooperation ist das Landesverkehrsmodell Bayern. Dieses wurde von der bayrischen Straßenbauverwaltung beauftragt und steht nun allen Gebietskörperschaften in Bayern zur Verfügung. Diese können das Modell den »von Ihnen beauftragten Gutachtern projektbezogen zur Verfügung stellen« (Peetz & Maget 2017, S. 30).

Regionale Erreichbarkeitsmodelle erzeugen modellseitig jedoch enorme Herausforderungen. Immer wieder wird betont, dass Erreichbarkeitsinstrumente die Möglichkeit zur Echtzeitberechnung bieten müssen (te Brömmelstroet *et al.* 2016; Silva *et al.* 2017a). Zudem werden häufig die geringe Datenverfügbarkeit und das fehlende lokale Wissen hervorgehoben. Die Validierung der Datenbasis hat somit eine zentrale Bedeutung. Hinzu kommt die fehlende oder nachrangige Berücksichtigung der öffentlichen Verkehrsmittel (Pütz & Schönfelder 2018).

Aufbau und Betrieb solcher Erreichbarkeitsmodelle binden erhebliche Ressourcen. Mitunter ist der Aufbau durchführbar, die langfristige Pflege jedoch nicht. Auch schränken immer komplexere Ansätze die Möglichkeiten zur Echtzeitberechnung von Planfällen¹⁰ erheblich ein. Es ist also nicht das fehlende Wissen zu Indikatoren und kartographischen Darstellungen, welche die Nutzung von Erreichbarkeitsmodellen einschränken, sondern fehlende technische, personelle und finanzielle Ressourcen, um solche Modelle aufzubauen und zu pflegen (Ahlmeyer & Wittowsky 2018, S. 532). Die in 21 Modellregionen gesammelten Erfahrungen im Aktionsprogramm »MORO – Modellvorhaben der Raumordnung« spiegeln diese Einschätzung wider. Demnach ist der mögliche Nutzen von Erreichbarkeitsmodellen in den Regionen unbestritten, gleichzeitig fehlt es an personellen und finanziellen Ressourcen, um die regelmäßige Modellaktualisierung zu gewährleisten, Berechnungen durchzuführen und eine Datenbasis mit Gelegenheiten der Grundversorgung aufzubauen (Nischwitz *et al.* 2019, S. 81).

Schlussendlich fehlt es auch an Hinweisen, wie Erreichbarkeitsmodelle überhaupt aufzubauen sind und wie die Widerstandsberechnung

10 Als Planfall oder Mit-Fall werden geplante oder fiktive Eingriffe in das Verkehrsnetz oder die Raumstruktur verstanden.

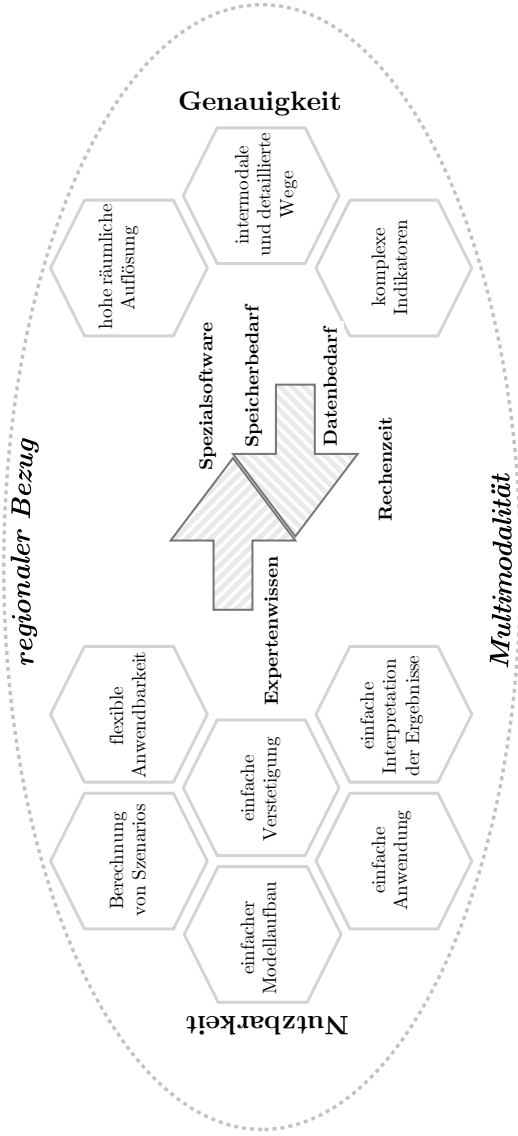
erfolgen soll. Dies betrifft u. a. die Modellierung der Verkehrsbelastung im MIV, die Berücksichtigung der Topographie im NMIV aber auch den Umgang mit Umstiegen und Bedienhäufigkeiten im ÖV.

1.6 Zielkonflikte beim Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen

Die angestrebte Praxisintegration von Erreichbarkeitsinstrumenten kann folglich nur gelingen, wenn vier grundsätzliche Probleme gelöst werden. Erstens müssen öffentliche Einrichtungen über die personellen oder finanziellen Ressourcen verfügen, um ein nutzbares Erreichbarkeitsmodell aufbauen oder beauftragen zu können. Zweitens müssen Kapazitäten und Fähigkeiten vorhanden sein, um mit diesem Modell zu arbeiten und die Ergebnisse richtig zu interpretieren. Drittens muss das Modell einen flexiblen Einsatz erlauben, der die Berechnung von Szenarien einschließt. Und viertens ist auch die dauerhafte Pflege bzw. die Verstetigung des Erreichbarkeitsmodells Teil einer erfolgreichen Integration in die Planungspraxis. Die Verstetigung darf die öffentliche Einrichtung weder finanziell noch personell überfordern. Die genannten Hindernisse werden über die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen adressiert (vgl. Abschnitt 1.3.2). Te Brömmelstroet (2017, S. 78) betont, dass die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen erhöht werden müsse, um insbesondere einen flexiblen, auf Echtzeitberechnungen basierenden Einsatz zu ermöglichen. Hierzu zählt auch die Verwendung einfacher Indikatoren, die die Rechenzeiten senken und die Interpretierbarkeit erhöhen (te Brömmelstroet *et al.* 2016, S. 1185). Zudem müssen die Modellannahmen, auf denen Erreichbarkeitsanalysen basieren, zukünftig transparenter dargestellt und allgemein verständlich aufbereitet werden. Boisjoly & El-Geneidy (2017b) bemängeln ebenfalls die geringe Nutzbarkeit bisheriger Erreichbarkeitsmodelle. Sie sehen jedoch fehlende Daten und ein fehlendes Expertenwissen der potenziellen Anwender als die wesentlichen Hürden. Grundsätzlich sollte es nicht nur Experten vorbehalten bleiben, Erreichbarkeitsmodelle aufzubauen oder zumindest anzuwenden.

Es stellt sich also die Frage, wie die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen zukünftig gesteigert werden kann. Hier entsteht jedoch ein

Abbildung 5: Zielkonflikt zwischen Nutzbarkeit und Genauigkeit von Erreichbarkeitsmodellen



Quelle: eigene Darstellung

Zielkonflikt, da die genannten Anforderungen zumeist eine prinzipiell geringere Modellgüte bedeuten, die hohe Genauigkeit bei der Erreichbarkeitsberechnung jedoch nicht in Frage stehen soll. Als Genauigkeit wird die Fähigkeit eines Erreichbarkeitsmodells verstanden, die realen Erreichbarkeitsverhältnisse realitätsgetreu darzustellen. Wesentlich für diese Genauigkeit sind die räumliche Auflösung der Standorte und Verkehrsnetze, die Detaillierung von Wegen sowie die Aussagekraft der verwendeten Indikatoren. Der Zielkonflikt ergibt sich aus dem negativen Einfluss einer hohen Genauigkeit auf zahlreiche Modelleigenschaften (vgl. Abbildung 5). So führt eine hohe räumliche Auflösung zu langen Rechenzeiten. Kurze Rechenzeiten sind jedoch essentiell für die Fähigkeit zur Echtzeitberechnung. Werden detaillierte Wege berechnet, erfordert dies ein umfangreiches Expertenwissen und geeignete Berechnungsroutinen. Detaillierte Wege können zudem ebenfalls die Rechenzeiten verlängern.

Die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen wird außerdem von regionalen Untersuchungsgebieten und multimodalen Verkehrsgraphen verringert. Je größer der modellhaft abzubildende Raum, desto länger die Rechenzeiten, Daten- und Speicherbedarfe. Hinzu kommt die hohe Menge des notwendigen Datentransfers bei webbasierten Anwendungen (Peter 2019). Erreichbarkeitsmodelle sollten jedoch auf regionaler Ebene angesiedelt sein, da nur dort die für den Aufbau und die Pflege notwendigen Ressourcen verfügbar sind. Es ist insofern nicht möglich, den Zielkonflikt über eine wesentliche Verkleinerung der Untersuchungsgebiete aufzulösen. Auch wird immer wieder die Berücksichtigung aller Verkehrsmittel und insbesondere öffentlicher Verkehrsmittel gefordert (van Wee 2016, S. 10). Gleichwohl erfordert gerade die detaillierte Nachbildung von ÖV-Wegen ein umfangreiches Expertenwissen sowie Fahrplandaten und spezielle Routingalgorithmen. Doch ist gerade das vielfache Fehlen von Erreichbarkeitswerten des öffentlichen Verkehrs ein wesentlicher Grund für die ausbleibende praktische Anwendung. Folglich ist, neben dem regionalen Bezug, auch die Multimodalität (vgl. Glossar) von Erreichbarkeitsmodellen unverzichtbar. Mit diesem Fokus lässt sich jedoch nicht beantworten, ob ein genaues und nutzbares regionales Erreichbarkeitsmodell einen zusätzlichen Nutzen stiftet. Zwar wird den potenziellen Anwendern der Zugang zu präzisen

Erreichbarkeitsanalysen erleichtert, dieser ist aber nicht gleichbedeutend mit einer vereinfachten Problemdurchdringung, versachlichten Kommunikation oder gesteigerter Arbeitseffizienz. Diese hängen im Wesentlichen von den Inhalten der Erreichbarkeitsinstrumente ab und sind insofern nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die Diskussion um die Modellvereinfachung berührt unmittelbar das »rigor-relevance dilemma« (Silva 2008; Vonk *et al.* 2005). Laut diesem Dilemma können die Genauigkeit und die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen nicht gleichzeitig erhöht werden. Da die Vereinfachung von Erreichbarkeitsmodellen jedoch unabdingbar ist, muss abgeschätzt werden, ob diese zu Genauigkeitsverlusten führt. Die Abschätzung erfolgt unter der Annahme einer regionalen Anwendung des Erreichbarkeitsmodells. Auch soll dieses Erreichbarkeitsmodell alle Verkehrsmodi umfassen, da das Fehlen unterschiedlicher Verkehrsmittel eine Beschränkung der möglichen Einsatzfelder bedeutet.

Da die räumliche Auflösung einen wesentlichen Einfluss auf die Rechenzeiten, Daten- und Speicherbedarfe aufweist ist zu untersuchen, welche Auflösung in Abhängigkeit vom Anwendungsfall überhaupt notwendig ist. Die räumliche Auflösung sollte in der Lage sein, die an das Modell gerichteten Fragestellungen hinreichend genau zu beantworten. Gleichzeitig ist es jedoch notwendig, die Auflösung auf das notwendige Maß zu beschränken, da zusätzliche Kleinräumigkeit zu exponentiell zunehmenden Rechenzeiten und zusätzlichen Datenbedarfen führt. Zusammengefasst steht die Kleinräumigkeit im direkten Widerspruch zur angestrebten Flexibilität und der Möglichkeit einer Echtzeitberechnung (Silva *et al.* 2017a, S. 143).

Auch die Detaillierung der Wege in den einzelnen Verkehrsmodi ist kritisch zu hinterfragen. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass die einzelnen Modi immer detaillierter abgebildet werden. Relevante Beispiele sind die Verwendung von Höhenmodellen, engmaschigen Straßennetzen, Verkehrsbelastungen und realen Fahrplandaten (Salonen & Toivonen 2013, S. 146). Der Aufbau detaillierter Netzmodelle ist jedoch nicht ohne ein umfangreiches Expertenwissen möglich. Zudem können sie die Rechenzeiten erheblich steigern. Es stellt sich also die Frage, für welche Indikatoren überhaupt welche Detaillierung angestrebt werden sollte und wie sich auch die räumliche Auflösung auf die notwendige

Detaillierung von Wegen auswirkt. Beispielsweise könnten die räumliche Auflösung reduziert, die Verkehrsgraphen simplifiziert und ausschließlich einfache Reiseaufwandsindikatoren berechnet werden.

Im Zusammenhang mit der praktischen Anwendung von Erreichbarkeitsmodellen ist außerdem zu untersuchen, welche Indikatoren überhaupt verwendet und verstanden werden. Auch ist zu prüfen, wie sich die Vereinfachung von Erreichbarkeitsmodellen auf die Genauigkeit unterschiedlicher Indikatoren auswirkt. Die Verwendung einfacher Reiseaufwandsindikatoren könnte zu einer erheblichen Reduzierung der Rechenzeiten beitragen.

Die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen wird außerdem von der Verfügbarkeit der genutzten Datenquellen sowie den verwendeten Berechnungsroutinen beeinflusst. Die Verkehrsgraphen könnten vor dem Hintergrund der Datenverfügbarkeit aufgebaut werden. Fraglich ist außerdem, welche Gelegenheiten zu berücksichtigen sind. Zwar werden Arbeitsplätze gerade im Zusammenhang mit Kumulationsindikatoren häufig verwendet, ihre Beschaffung stellt jedoch eine hohe Herausforderung dar, da keine freiverfügbaren Datenquellen mit einer hohen Qualität vorhanden sind. Schlussendlich ist darauf zu achten, dass die Modelle mit einer Software aufgebaut werden, die keine hohen Lizenzgebühren erfordert und eine einfache Einarbeitung ermöglicht.

1.7 Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit

In der ersten Forschungsfrage wird ein Verfahren für den Aufbau eines regionalen und multimodalen Erreichbarkeitsmodells mit einer hohen räumlichen Auflösung vorgestellt. Der Modellaufbau orientiert sich am aktuellen Stand der Forschung und möglichen praktischen Einsatzgebieten. Darüber hinaus soll es das Modell ermöglichen, die Wirkung der räumlichen Auflösung in Abhängigkeit unterschiedlicher Modellkonfigurationen zu untersuchen (Abschnitt 1.7.3). Anhand von Nahverkehrsplänen (NVP) wird untersucht, welche Anforderungen die Planungspraxis an die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen stellt (Abschnitt 1.7.2). Dabei sollen vor allem Erkenntnisse hinsichtlich der Integration des öffentlichen Verkehrssystems in regionale Erreichbarkeitsmodelle gewonnen werden. Aufbauend auf der ersten Forschungsfrage

ist außerdem zu diskutieren, welchen Beitrag ein multimodales und hochaufgelöstes Erreichbarkeitsmodell in der Nahverkehrsplanung leisten könnte. In Forschungsfrage 3 wird aufgezeigt, mit welcher Modelldetaillierung eine hohe Genauigkeit erzielt wird und die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen gleichzeitig erhalten bleibt. Auf den nächsten Seiten werden die Motivation, die Ziele und die Methodik für die Beantwortung der Forschungsfragen näher erläutert.

1.7.1 Forschungsfrage 1: Aufbau eines regionalen Erreichbarkeitsmodells

Wie muss ein regionales Erreichbarkeitsmodell aufgebaut sein, um multimodale und kleinräumige Erreichbarkeiten mit einer hohen Genauigkeit abzubilden?

Zwar kommen bereits einige regionale Erreichbarkeitsmodelle mit einer hohen Auflösung zum Einsatz, diese basieren jedoch auf zahlreichen Vereinfachungen und sind nicht immer mit einem vertretbaren Aufwand übertragbar. Folglich soll ein Modellansatz entwickelt werden, der auf gängiger Software basiert und eine detaillierte Berechnung von Wegen auf einem multimodalen Verkehrsgraphen ermöglicht. Das Erreichbarkeitsmodell muss außerdem in der Lage sein, komplexe Erreichbarkeitsindikatoren für alle Gelegenheitstypen und in einer geringen Rechenzeit zu berechnen. Für die avisierte Praxisanwendung muss es möglich sein, Planfälle flexibel zu berechnen und das Modell mit einem geringen Aufwand zu aktualisieren.

Ausgangslage

Bisher existieren nur wenige regionale Erreichbarkeitsmodelle mit einer hohen räumlichen Auflösung. Da die Nutzbarkeit solcher Modelle ganz erheblich von der Menge der Raumeinheiten und Gelegenheiten abhängt ist nicht verwunderlich, dass die Auflösung mit zunehmender Gebietsgröße stetig abnimmt. Soll die Erreichbarkeit jedoch auf Ebene von Bundesländern oder Nationalstaaten mit einer hohen räumlichen Auflösung berechnet werden, kann das Raumbezugssystem schnell über 100 Tsd. Raumeinheiten umfassen. So umfangreiche Erreichbarkeitsmodelle

sind aufgrund des hohen Entwicklungsaufwands aber noch die absolute Ausnahme. Zu nennen sind beispielsweise das Erreichbarkeitsmodell Österreichs mit rund 570 Tsd. bewohnten 100-Meter-Zellen und ein Modell der Metropolregion Tel Aviv mit mehr als 100 Tsd. Gebäuden (Benenson et al. 2017b; Weiss et al. 2018). Diese Modelle sind bisher jedoch nicht in der Lage, die gesamte Bandbreite komplexer Erreichbarkeitsindikatoren für alle Verkehrsmodi und auf detaillierten Verkehrsgraphen zu berechnen. So verwenden Benenson *et al.* (2017b, S. 220) eine vereinfachte Haltestellenanbindung im Umkreis von lediglich 400 Metern, die zu einem strukturellen Unterschätzen der ÖV-Erreichbarkeit führt. Der genutzte Routingalgorithmus stellt zudem eine Eigenentwicklung dar, die nur mit einem hohen Expertenwissen in anderen Forschungseinrichtungen oder Planungsbehörden zum Einsatz gebracht werden kann.

Das Österreich-Modell der Österreichischen Raumordnungskonferenz (ÖROK) ist eine vielversprechende Kombination leistungsfähiger und kommerzieller Softwarepakete (ÖROK 2018; Weiss *et al.* 2018). Deswegen ungeachtet ist es unter anderem nicht möglich, die Widerstände des MIV in Abhängigkeit von parkbezogenen Reisezeiten¹¹ (PRZ) zu berechnen und die Startwartezeit (SWZ) im ÖV zu ermitteln. Zahlreiche Praxisprojekte haben außerdem gezeigt, dass sich bisher kein überlegener Ansatz zur Erreichbarkeitsmodellierung etablieren konnte und mitunter auch die transparente Darstellung der verwendeten Verfahren fehlt.

Ziele

Aufbauend auf den bereits geleisteten Vorarbeiten soll ein Erreichbarkeitsmodell entwickelt werden, welches mit freier oder kommerzieller Software betrieben werden kann, eine hohe räumliche Auflösung besitzt und gleichzeitig eine schnelle Berechnung unterschiedlicher komplexer Erreichbarkeitsindikatoren ermöglicht. Methodische Weiterentwicklungen sind insbesondere die Berechnung einer Startwartezeit (SWZ) im ÖV, die vollständige Integration des NMIV, die Modellierung differenzierter

11 Diese umfassen die fußläufigen Zu- und Abwege, den Parksuchverkehr sowie die eigentlichen Rüstzeiten (Aufschließen, Gepäck verstauen, Starten etc.).

PRZ im MIV und die Berücksichtigung unterschiedlicher Gelegenheits-typen mit zusammen mehr als 50 Tsd. Standorten.

Der methodische Ansatz soll außerdem eine gute Übertragbarkeit in die Planungspraxis aufweisen. Aus diesem Grunde werden bei der Modellerstellung sowohl die Aktualisierbarkeit als auch die flexible Berechnung von Planfällen berücksichtigt. Darüber hinaus soll das entwickelte Verfahren transparent dargestellt und mögliche Einsatzgrenzen diskutiert werden.

Vorgehen

Ein Erreichbarkeitsmodell umfasst Gelegenheiten, Raumbezugssysteme, Verkehrsgraphen, Routingalgorithmen und Routinen zur Berechnung der Erreichbarkeitsindikatoren. Die besonderen Herausforderungen sind die Erstellung eines Verkehrsgraphen für den öffentlichen Verkehr, die Auswahl eines geeigneten Routingverfahrens und die Integration der einzelnen Modellbestandteile über einen Berechnungsalgorithmus. Mit Hilfe einer Literaturanalyse werden unterschiedliche Verfahren im Umgang mit öffentlichen Verkehrsmitteln in Erreichbarkeitsmodellen ermittelt. Für das untersuchte Sampling werden jeweils die Gebietsgröße und die räumliche Auflösung, die Detaillierung der Verkehrsgraphen und die Wahl von Parametern, der Umgang mit Fahrplänen, die eingesetzte Software und die berechneten Erreichbarkeitsindikatoren erhoben. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die Modellierung eines eigenen ÖV-Verkehrsgraphen und die anschließende Berechnung bester Wege. Anschließend wird ein eigenes Verfahren zur Integration der Modellbestandteile und der Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren entwickelt. Die Berechnungsergebnisse wurden im Rahmen des Leitprojektes »Regionale Erreichbarkeitsanalysen« der MRH¹² öffentlich zugänglich gemacht und in der Planungspraxis angewendet. So konnten strukturelle Fehler im Standort- und Netzmodell frühzeitig erkannt werden. Ferner war es möglich, die Nutzbarkeit der Ergebnisse in der Praxis zu überprüfen und mögliche Hindernisse bei einer Übertragung auf andere Regionen zu identifizieren.

12 Projektseite: <http://metropolregion.hamburg.de/erreichbarkeitsanalysen> (letzter Zugriff: 03.01.2020)

1.7.2 Forschungsfrage 2: Erreichbarkeitsanalysen in der Planungspraxis

Welche Verfahren zur Modellierung der Erreichbarkeit mit öffentlichen Verkehrsmitteln werden in der Nahverkehrsplanung aktuell eingesetzt?

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, reduziert eine zusätzliche Genauigkeit die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen. Die Genauigkeit der Modelle wird wesentlich von ihrer räumlichen Auflösung, der Detaillierung der Wege sowie den genutzten Indikatoren beeinflusst (vgl. Abbildung 5). Bevor jedoch untersucht wird, inwiefern sich eine Reduzierung der Modelldetaillierung auf die Güte der Modellergebnisse auswirkt, ist zu hinterfragen, welche Detaillierung in der praktischen Anwendung überhaupt zum Einsatz kommt.

Ausgangslage

In den vergangenen Jahren haben sich unterschiedliche Untersuchungen mit der Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsinstrumenten in der Planungspraxis beschäftigt (vgl. Abschnitt 1.3.2). Ein Großteil dieser Untersuchungen wurde innerhalb eines Forschungsnetzwerkes durchgeführt, welches im Rahmen der COST Action TU1002 »*Accessibility Instruments for Planning Practice in Europe*« zwischen 2012 und 2013 entstanden ist (te Brömmelstroet *et al.* 2014; Hull *et al.* 2012). Im Zentrum stand die Frage, welche Erreichbarkeitsinstrumente in der Planungspraxis nützlich und anwendbar sind. Der Nutzen (usefulness) wurde u. a. über die Fähigkeit zur Problembeschreibung, zur Kommunikation und zur strategischen Planung operationalisiert (te Brömmelstroet *et al.* 2016, S. 1180). Die Nutzbarkeit (usability) beschreibt hingegen die Möglichkeit der Anwender, die dargestellten Indikatoren zu verstehen und auf konkrete Fragestellungen zu übertragen (ebd., S. 1179).

In den Workshops wurde nur die praktische Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsinstrumenten untersucht, die bereits vorab im wissenschaftlichen Bereich entwickelt wurden. Nicht beantwortet wurde, ob eine Vereinfachung der jeweils zugrundeliegenden Modelle zu einer verminderten Nutzbarkeit führt. Die Untersuchungen zeigten nur geringe Unterschiede der Nutzbarkeit unterschiedlicher räumlicher Auflösungen,

Indikatoren und Verkehrsmodi (te Brömmelstroet *et al.* 2014, S. 163ff.; te Brömmelstroet *et al.* 2016, S. 1188ff.). Diese geringen Unterschiede ermöglichen es nicht, Schlussfolgerungen hinsichtlich der für die praktische Arbeit notwendigen Modelldetaillierung zu ziehen.

In anderen Untersuchungen wurde indes versucht, den Umgang mit Erreichbarkeitskriterien in der Praxis zu erforschen. Beispielsweise hat eine Analyse von 42 regional transport plans (RTP) in den USA gezeigt, dass nach wie vor eine große Lücke zwischen der wissenschaftlichen Diskussion um Erreichbarkeit und ihrer praktischen Anwendung besteht (Proffitt *et al.* 2019). Nur in rund der Hälfte der RTP werden Erreichbarkeitsziele definiert und diese nur in wenigen Fällen über Erreichbarkeitskriterien operationalisiert (ebd., S. 184). Hinzu kommt, dass Erreichbarkeit zumeist über den Zugang (access) zum Verkehrssystem und nicht über die Möglichkeit zur Zielerreichung definiert wird (ebd., S. 185). In einer ähnlichen Untersuchung verglichen Boisjoly & El-Geneidy (2017a) die Verkehrspläne von weltweit 32 Metropolregionen. Sie betonen, dass eine Bedeutungszunahme von Erreichbarkeitszielen zu beobachten ist. Gleichzeitig ist ihre Operationalisierung über Kennzahlen noch die Ausnahme (ebd., S. 48). Die geringe Verankerung von Kriterien konnte von den Autoren auch bei einer Befragung von 343 Praktikern aus dem öffentlichen und privaten Sektor beobachtet werden (Boisjoly & El-Geneidy 2017b, S. 39). Als die wesentlichen Barrieren werden insbesondere fehlendes Wissen und fehlende Daten hervorgehoben (ebd., S. 37). Die genannten Forschungsarbeiten hatten jedoch das Ziel, den Umgang mit Erreichbarkeiten zu beschreiben und den Umgang mit Kennzahlen und Indikatoren zu ermitteln. Rückschlüsse auf die Modelldetaillierung und die berücksichtigten Verkehrsmodi lassen sich aber nur in begrenztem Umfang ableiten.

Ziele

Am Beispiel von Nahverkehrsplänen wird der Umgang mit Erreichbarkeitsinstrumenten in der Planungspraxis beispielhaft untersucht. Bei diesen Plänen handelt es sich um öffentliche Planungsdokumente, die der strategischen Entwicklung des öffentlichen Verkehrsangebotes dienen. Gegenstand dieser Pläne sind sowohl die Darstellung des gegenwärtigen Angebotes als auch die Verankerung von Entwicklungszielen und

konkreter Maßnahmen. Beides wird auch mit Hilfe der Erreichbarkeitsanalysen durchgeführt. In diesem Zusammenhang stellt sich insbesondere die Frage, auf welchen räumlichen Auflösungen die bisher durchgeführten Erreichbarkeitsanalysen basieren und welche Detaillierungen dem intermodalen Verkehrsgraphen des öffentlichen Verkehrs zugrunde liegt. Dabei geht es auch um die Anforderungen, die mit der Operationalisierung und Evaluierung von Erreichbarkeitskriterien und Erreichbarkeitszielen verbunden sind. Mit Beantwortung dieser Forschungsfrage wird die Rolle von Erreichbarkeitsanalysen in der gegenwärtigen Nahverkehrsplanung herausgearbeitet. Zusätzlich werden Empfehlungen hinsichtlich des Aufbaus von Erreichbarkeitsmodellen gegeben, um ihren Einsatz in der Nahverkehrsplanung zu erleichtern.

Methode

Da die Integration öffentlicher Verkehrsmittel in Erreichbarkeitsmodelle einen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet, wird der Bereich der ÖPNV-Planung exemplarisch ausgewählt, um den Einsatz von Erreichbarkeitsanalysen zu untersuchen. Nahverkehrspläne sind strategische und formale Planungsinstrumente zur mittel- und langfristigen Entwicklung des ÖPNV. Nach Holz Rau *et al.* (2009, S. 1) sollen sie die Aufgabenträger in die Lage versetzen, das ÖPNV-Angebot zu entwickeln und gleichzeitig sowohl finanzielle als auch landesplanerische Rahmenbedingungen berücksichtigen. Ihre rechtliche Verankerung und Ausgestaltung werden in Abschnitt 4.1.1 näher erläutert.

NVP werden auch daher ausgewählt, da von besonders hohen Anforderungen an die Modellierung des öffentlichen Verkehrssystems auszugehen ist. Raumwiderstände, die den ÖPNV betreffen aber in diesen Plänen nicht aufgeführt sind, können als vernachlässigbar angesehen werden. Zu diesen Raumwiderständen könnten beispielsweise die Bedienungshäufigkeit, die Startwartezeit oder der Fahrpreis gehören. Das Sampling umfasst insgesamt 22 NVP. Die Metropolregion Hamburg mit ihren Landkreisen und kreisfreien Städten ist in diesem Sampling vollständig vertreten. Es wird eine Dokumentenanalyse durchgeführt, in der die folgenden Kriterien im Fokus stehen:

- verwendete Indikatoren und Formalisierung der Angebotsqualitäten
- zugrundeliegende räumliche Auflösung bei der Festlegung und Bewertung von Erreichbarkeitsstandards

- verwendeter Modellierungsansatz bei den dargestellten Erreichbarkeitsanalysen

Die Angebotsqualität des öffentlichen Verkehrssystems wird über die Erschließungs-, Bedienungs- und Verbindungsfunktion abgebildet (VDV 2019; FGSV 2010). Der Umgang mit Erreichbarkeit ist in drei Stufen unterteilt. Die erste Stufe ist die Formulierung von Erreichbarkeitszielen. In der Regel ist es jedoch nur indirekt möglich, aus diesen Zielen Indikatoren, die räumliche Auflösung und den notwendigen Modellierungsansatz abzuleiten. Die zweite Stufe bildet die Festlegung von Standards. Diese Standards lassen sich zumeist direkt in einen Erreichbarkeitsindikator übersetzen. Beispielsweise kann gefordert werden, dass alle Bewohner in einem Landkreis innerhalb von 600 Metern die nächste Haltestelle erreichen sollen. Unklar bleibt jedoch, mit welcher Auflösung die Wohnstandorte zu berücksichtigen sind und ob die 600 Meter einer Luftlinien- oder einer Realdistanz entsprechen. Wenn in NVP zahlreiche und detaillierte Erreichbarkeitsanalysen abgebildet werden, lassen sich aus diesen zumeist das räumliche Bezugssystem und der genutzte Modellierungsansatz herauslesen. Im Ergebnis lässt sich ein differenziertes Bild hinsichtlich der Durchführung und Darstellung von Erreichbarkeitsanalysen in der Nahverkehrsplanung zeichnen. In der anschließenden Forschungsfrage wird dann u. a. untersucht, in welchem Umfang die formulierten Erreichbarkeitsstandards und die durchgeführten Erreichbarkeitsanalysen die Realbedingungen verzerren.

1.7.3 Forschungsfrage 3: Die räumliche Auflösung von Erreichbarkeitsmodellen

Wie beeinflusst die räumliche Auflösung die Genauigkeit von Erreichbarkeitsmodellen unter besonderer Berücksichtigung multimodaler Verkehrsgraphen?

Die Rechenzeiten und Datenbedarfe von Erreichbarkeitsmodellen werden primär über ihre räumliche Auflösung beeinflusst. Beide Faktoren haben einen erheblichen negativen Einfluss auf die Flexibilität, die Nutzbarkeit und die Verstetigung dieser Modelle. Folglich ist zu untersuchen, ob der

Genauigkeitsgewinn einer hohen räumlichen Auflösung diese Nachteile rechtfertigt und zu welchen Verzerrungen eine Reduzierung der räumlichen Auflösung führt. Es stellt sich außerdem die Frage, wie sich die räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten ändert, wenn sich die Detaillierung der Verkehrsgraphen reduziert. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass einzelne Netzelemente die Nutzbarkeit eines Erreichbarkeitsmodells negativ beeinflussen. Zudem kann gerade in regionalen Modellen die Detaillierung der Verkehrsgraphen nicht isoliert von der räumlichen Auflösung betrachtet werden. Beispielsweise ist zu hinterfragen, welchen Einfluss die Modellierung von realen Gehzeiten zu den Haltestellen hat, wenn ein regionales Erreichbarkeitsmodell lediglich auf Ebene von Gemeinden aufgelöst ist. Entsprechend ist der Einfluss unterschiedlicher Netzelemente auf die Genauigkeit eines Erreichbarkeitsmodells in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung zu untersuchen.

Ausgangslage

Gerade regionale Erreichbarkeitsmodelle stehen im Spannungsverhältnis zwischen wissenschaftlichen Ansprüchen, planerischen Anforderungen und praktischer Nutzbarkeit. In der Vergangenheit konnte eine Entwicklung zu immer höher aufgelösten Erreichbarkeitsmodellen beobachtet werden. Größe und Zuschnitt räumlicher Bezugssysteme führen zu unterschiedlichen Verzerrungen die unter dem Schlagwort des MAUP (modifiable areal unit problem) diskutiert werden (Openshaw 1984). Grundsätzlich führt eine Verkleinerung von Raumeinheiten zu einer genaueren Abbildung räumlicher Interaktionen (ESPON 2006; Madelin *et al.* 2009). Da diese Interaktionen zumeist an Zentroide¹³ gebunden sind, reduziert eine höhere Auflösung den Unterschied zwischen realen und modellierten Wegen (vgl. Abbildung 6).

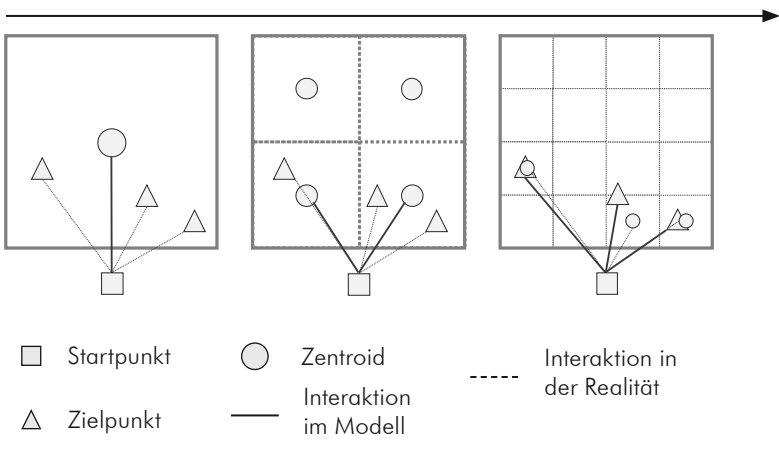
In wissenschaftlichen Untersuchungen konnten bisher jedoch keine nennenswerten Vorteile einer sehr hohen Auflösung auf die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsinstrumenten in der Planungspraxis gefunden werden (te Brömmelstroet *et al.* 2016, S. 1187). Diese Untersuchung hat sich jedoch auf den Umgang mit fertigen Erreichbarkeitsinstrumenten konzentriert. Es ging weder um die Einfachheit und Flexibilität der Erreichbarkeitsberechnung noch um den Modellaufbau. In einer

13 Bezugspunkte von Raumeinheiten

weiteren Untersuchung von unterschiedlichen Praxisbeispielen wurde außerdem festgestellt, dass Erreichbarkeitsinstrumente mit einem hohen vermuteten Nutzen eher hohe Anforderungen an die Anwender stellen. Hinsichtlich der Anwendbarkeit, Flexibilität und Performance als eher nutzerfreundlich bewertete Instrumente, wurden hingegen als weniger nützlich eingestuft (Silva *et al.* 2017a, S. 142).

Abbildung 6: Funktionsweise des Zentroidproblems

räumliche Disaggregation = Reduzierung des Zentroidproblems



Quelle: eigene Darstellung

Betont werden immer wieder die langen Rechenzeiten aufgrund einer hohen räumlichen Auflösung (Benenson *et al.* 2017b, S. 215, 236; Nicolai & Nagel 2011, S. 14). Die Bewertung von Planfällen und Szenarien erfordert indes eine schnelle Neuberechnung von Erreichbarkeitsindikatoren. Es ist also notwendig, Erreichbarkeitsmodelle gegenüber Eingriffen in die Raumstruktur und die Verkehrsnetze zu öffnen und ihre Nutzbarkeit gleichzeitig zu sichern. Außerdem wird immer wieder die Forderung nach einer dauerhaften Integration von Erreichbarkeitsinstrumenten in etablierte Planungsprozesse geäußert (Owen & Levinson 2012, S. 1). Auch in diesem Zusammenhang ist es notwendig, dass eine zügige Neuberechnung der Indikatoren nach einer Aktualisierung von Standorten möglich ist.

Es ist also nicht nur notwendig, die möglichen Vorteile einer hohen räumlichen Auflösung zu untersuchen, sondern auch mögliche Nachteile bei ihrer Reduzierung. Es existieren bereits zahlreiche Arbeiten, die sich mit den Wirkungen des MAUP in Erreichbarkeitsmodellen beschäftigen (Hewko *et al.* 2002; Stepniak & Jacobs-Crisioni 2017; Stepniak & Rosik 2015). Was jedoch fehlt, ist eine differenzierte Betrachtung in Abhängigkeit vom Modellierungsansatz und der verwendeten Erreichbarkeitsindikatoren. Außerdem wird der öffentliche Verkehr, jedenfalls im Kontext möglicher Aggregationsfehler, in der Forschung bisher nahezu nicht beachtet. In einem Großteil der Arbeiten wird nur der MIV berücksichtigt, da die Berechnungen für den ÖV als zu aufwendig angesehen werden (Hewko *et al.* 2002; Kwan & Weber 2008). Diese Arbeit verfolgt somit auch das Ziel, die Bedeutung hochaufgelöster Raumbezugssysteme in regionalen Erreichbarkeitsmodellen und in Abhängigkeit aller Verkehrsmodi zu bestimmen.

Ziele

Aufbauend auf dem entwickelten regionalen Erreichbarkeitsmodell wird untersucht, welche Genauigkeitsverluste auftreten, wenn von der maximalen Auflösung eines 100-Meter-Rasters abgewichen wird. Die Vergleichssysteme umfassen Rastermodelle (500-Meter, 1-Kilometer, 5-Kilometer), Gemeinden und statistische Gebiete (nur Hamburg). Auf Basis von Aggregationsfehlern ist zu diskutieren, ob die zusätzliche Nutzbarkeit diese Verzerrungen rechtfertigt. Außerdem werden Hinweise zur Interpretation geringer aufgelöster Erreichbarkeitswerte gegeben. Es wird vermutet, dass die folgenden Modellbestandteile einen Einfluss auf mögliche Aggregationsfehler haben:

- Verkehrsmodi
- Verkehrsgraphen
- Erreichbarkeitsindikatoren
- Gelegenheiten (Dichte der Einrichtungen je Gelegenheitstyp)

Untersucht wird außerdem der Einfluss der Haltestellenanbindung, der PRZ und der Realdistanz im Fußverkehr auf die Genauigkeit eines Erreichbarkeitsmodells in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass diese mit einer hohen

Detailierung steigt, während die Nutzbarkeit des Modells zurückgeht. Es muss jedoch beantwortet werden, wie groß der Genauigkeitsgewinn wirklich ist. In diesem Zusammenhang soll auch untersucht werden, ob und ab wann eine geringere räumliche Auflösung dazu führt, dass sich die aus detaillierten Verkehrsgraphen ergebenden Reisezeitunterschiede eingeebnet werden. Im Gegensatz dazu ist auch denkbar, dass eine hohe räumliche Auflösung überflüssig ist, wenn die Raumwiderstände nicht einem vergleichbar detaillierten Verkehrsgraphen entstammen. Dies betrifft insbesondere die einfache Berücksichtigung von Parkzeiten über konstante Zeitaufschläge. Abschließend werden Empfehlungen für die Wahl der räumlichen Auflösung und der Detailierung von Verkehrsgraphen in Abhängigkeit vom Untersuchungsgegenstand gegeben.

Methode

Die Verzerrungen, die sich bei einem Unterschreiten der Referenzauflösung (100-Meter-Raster) ergeben, werden mit Hilfe des Variationskoeffizienten (VarK) ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass eine Erhöhung von Erreichbarkeitswerten je Raumeinheit einen Genauigkeitsgewinn bedeutet. Der Maßstabeffekt (*Skaleneffekt*) besagt, dass die Variation zwischen Einzelwerten von der Menge an Werten in einem Untersuchungsgebiet abhängt (Dark & Bram 2007, S. 472). Abbildung 7 zeigt mögliche Fälle einer Reisezeitvariation auf Ebene eines 100-Meter-Rasters innerhalb einer 500-Meter-Zelle. Je größer die Variation zwischen den Einzelwerten, desto höher der Genauigkeitsgewinn einer höheren Auflösung. Der VarK entspricht dem Verhältnis der Standardabweichung einer Verteilung zu ihrem Mittelwert (vgl. Gleichung 1). Ein Wert > 1 bedeutet, dass die Einzelwerte im gewichteten Mittel um 100% von ihrem Durchschnitt abweichen.

Gleichung 1

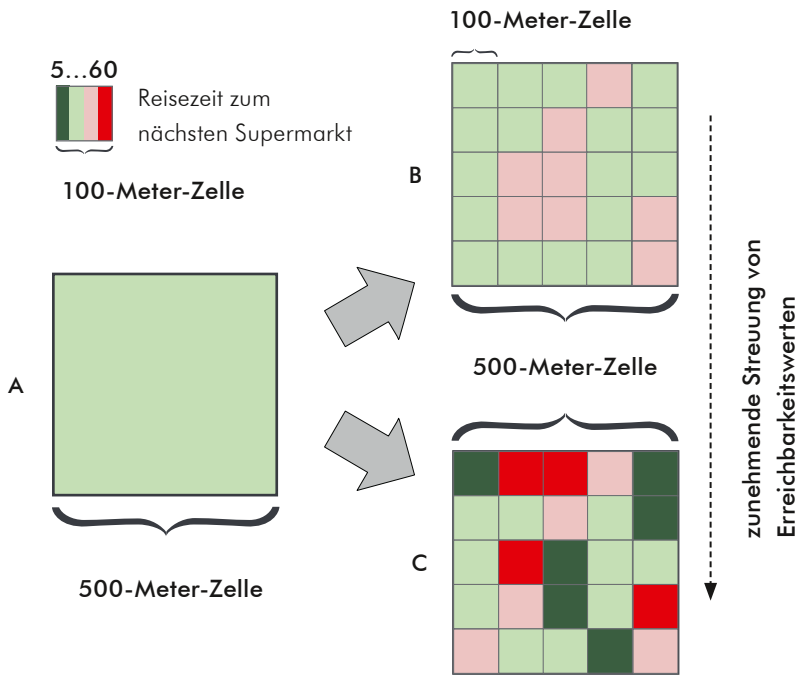
VarK_x = Variationskoeffizient einer Verteilung x

$$\text{VarK}_x = \frac{s_x}{\bar{x}_x}$$

s_x = Standardabweichung einer Verteilung x

\bar{x}_x = Mittelwert einer Verteilung x

Abbildung 7: Quantifizierung von Aggregationsfehlern in Erreichbarkeitsmodellen



Quelle: eigene Darstellung

Die Verwendung von Variationskoeffizienten (VarK) in Erreichbarkeitsuntersuchungen ist nicht neu. Benenson *et al.* (2017b) untersuchten die Auswirkungen einer hohen räumlichen Auflösung auf die Genauigkeit eines Kumulationsindikators im MIV und ÖPNV am Beispiel von Tel Aviv. Dabei ermittelten sie eine höhere Streuung von Erreichbarkeitswerten im ÖPNV (ebd., S. 215). In dieser Analyse wurde außerdem gezeigt, dass die Variation von Erreichbarkeitswerten auf Gebäudeebene innerhalb von Verkehrszellen mit der Verkehrszellengröße zu- und mit der Größe des Reisezeitbudgets abnimmt (ebd., S. 228). Untersucht wurde jedoch nicht der Einfluss der Modellierung des ÖV-Verkehrsgraphen. Ferner fehlen der Fuß- und Radverkehr sowie ein Vergleich unterschiedlicher Indikatoren. Stępnia & Goliszek (2017) nutzten den VarK, um

Veränderungen der ÖPNV-Arbeitsplatzerreichbarkeit im Tagesverlauf zu zeigen. Ein großer VarK und damit große tageszeitliche Unterschiede treten gerade in den schlecht angebundenen Stadtrandgebieten auf (ebd., S. 258). In diesen Gebieten sind zu einzelnen Tageszeiten (zumeist in der Hauptverkehrszeit) zahlreiche Arbeitsplätze zu erreichen, in den Nebenverkehrszeiten ist das Angebot aber stark ausgedünnt.

Tabelle 5: Detaillierungsstufen der Verkehrsgraphen

Modellparameter	Minimalfall	vereinfachter Fall	Maximalfall
Haltestellenanbindung	Luftlinie zur nächsten Haltestelle	Luftlinie zu mehreren Haltestellen	Gehzeit im Fußwegenetz zu mehreren Haltestellen
PRZ	ohne PRZ	konstante PRZ	räumlich differenzierte PRZ
Realdistanzen im Fußverkehr	Luftliniendistanz		Realdistanz im Fußwegenetz

Quelle: eigene Darstellung

Der Vergleich der einzelnen Modellparameter erfolgt auf Basis von drei unterschiedlich detaillierten Modellansätzen (vgl. Tabelle 5). Dabei handelt es sich jeweils um einen Ansatz mit einer maximalen, einer vereinfachten und einer minimalen Detaillierung der Haltestellenanbindung, PRZ und Wegeberechnung im NMIV. Es werden für unterschiedliche räumliche Auflösungen die Erreichbarkeitsunterschiede auf Ebene von Einwohnern dargestellt. Im Ergebnis wird deutlich, welche Netzdetailierung in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung und der berechneten Indikatoren anzuwenden ist.

1.7.4 Aufbau der Forschungsarbeit

Im ersten Kapitel werden der Forschungsanlass diskutiert und die Forschungsfragen vorgestellt. Das nächste Kapitel widmet sich unterschiedlichen Definitionen von Erreichbarkeit und den daraus abgeleiteten Erreichbarkeitsindikatoren. Die in dieser Arbeit verwendeten Indikatoren werden näher beschrieben und ihre Vor- und Nachteile vor dem Hintergrund

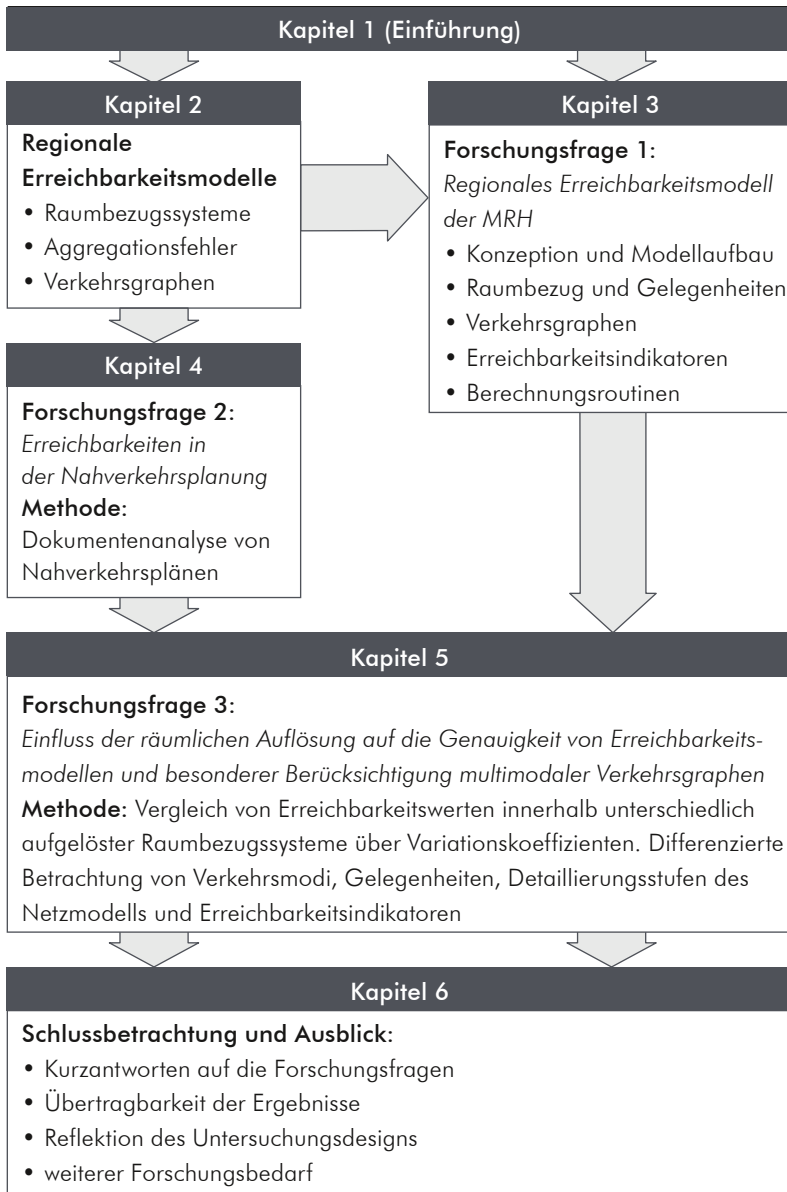
eines regionalen Einsatzgebietes diskutiert. Der besondere Fokus liegt jedoch auf der räumlichen Auflösung in regionalen Erreichbarkeitsmodellen und dem Umgang mit Aggregationsfehlern (vgl. Abbildung 8). Es werden der Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Nutzbarkeit der Modelle diskutiert und mögliche Aggregationsfehler erörtert. Der letzte Abschnitt widmet sich der Modellierung multimodaler Verkehrsgraphen in regionalen Erreichbarkeitsmodellen. Den Schwerpunkt bildet eine Literaturanalyse zur Modellierung des öffentlichen Verkehrssystems in regionalen Erreichbarkeitsmodellen.

Im anschließenden dritten Kapitel wird der Aufbau eines regionalen und multimodalen Erreichbarkeitsmodells mit einer hohen räumlichen Auflösung vorgestellt. Dieses Modell kommt auch bei der Beantwortung der zweiten und dritten Forschungsfrage zum Einsatz. Der Modellaufbau wird zuerst vor dem Hintergrund bereits eingesetzter Erreichbarkeitsmodelle und dem aktuellen Forschungsstand diskutiert. Die zweite Forschungsfrage wird im vierten Kapitel beantwortet. Der Einsatz von Erreichbarkeitsinstrumenten in der Planungspraxis wird anhand von Beispielen aus den US, dem Vereinigten Königreich und Österreich dokumentiert. Anschließend wird eine Dokumentenanalyse von NVP vorgenommen, um die Bedeutung der Erreichbarkeitsanalyse in der Nahverkehrsplanung herauszuarbeiten. Die Analyse soll zeigen, welche räumliche Auflösung und welchen Modellierungsansatz regionale Erreichbarkeitsmodelle aufweisen müssen, um für Erreichbarkeitsberechnungen in aktuellen NVP eingesetzt zu werden. Die Dokumentenanalyse ist ein etabliertes Vorgehen bei der Auswertung öffentlicher Unterlagen und wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach auf NVP angewendet (BMVBS 2010b; Winter 2005).

Die Bedeutung der räumlichen Auflösung ist der Schwerpunkt in Kapitel 5. Unter Verwendung unterschiedlicher VarK wird gezeigt, inwiefern sich die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung verändert. Für die berücksichtigten räumlichen Auflösungen erfolgt eine Analyse für die einzelnen Erreichbarkeitsindikatoren, Verkehrsmodi und Gelegenheitstypen. Kapitel fünf widmet sich anschließend dem Modellierungsansatz und der Berechnung von Raumwiderständen. Unter Berücksichtigung der einzelnen räumlichen Auflösungen und Gelegenheitstypen sollen die Auswirkungen

auf die Modellgüte für unterschiedlich detaillierte Verkehrsgraphen untersucht werden. Die Detaillierung hängt von der Haltestellenanbindung, möglichen Realdistanzen im Fußverkehr und PRZ im MIV ab. Das Kapitel schließt mit Empfehlungen für den Aufbau und den Einsatz regionaler Erreichbarkeitsmodelle. Die Empfehlungen beziehen sich vor allem auf die räumliche Auflösung sowie die genannten Modellbestandteile. Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer Einordnung der Ergebnisse, einer Reflexion der Methode sowie einer Skizzierung des weiteren Forschungsbedarfs (Kapitel 6).

Abbildung 8: Aufbau der Arbeit



Quelle: eigene Darstellung

2 Die Grundlagen regionaler Erreichbarkeitsmodelle

Die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsinstrumenten im regionalen Kontext wird von der räumlichen Auflösung, der Detaillierung der Verkehrsgraphen und den verwendeten Erreichbarkeitsindikatoren beeinflusst (vgl. Abbildung 5). Nachfolgend wird insbesondere aus Perspektive der Modellentwickler diskutiert, welche besonderen Herausforderungen regionale Erreichbarkeitsmodelle bereithalten. Das Kapitel beginnt mit einer Übersicht der bisherigen nationalen und internationalen Erfahrungen im Umgang mit Erreichbarkeitsmodellen. Die anschließenden Abschnitte widmen sich der Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren, der Bedeutung der räumlichen Auflösung und den Möglichkeiten zur vom Verkehrsmodus abhängenden Widerstandsberechnung. Einen besonderen Schwerpunkt bildet die Modellierung des fahrplanbasierten öffentlichen Verkehrssystems.

2.1 Erreichbarkeitsmessung in regionalen Modellen

Mit Hilfe von Erreichbarkeitsindikatoren werden Erreichbarkeiten gemessen, dargestellt und interpretiert (vgl. Glossar). Sie sind das Bindeglied zwischen Erreichbarkeitsdefinitionen und Erreichbarkeitsmodellen, dienen also der Übersetzung von Erreichbarkeitstheorien in messbare Größen. Nach Geurs & Ritsema van Eck (2001, S. 23ff.) lassen sich Erreichbarkeitswerte als *intermediate indicators* oder als *final indicators* definieren. Werden Änderungen am Landnutzungs- und Verkehrssystem bewertet, dienen Erreichbarkeitswerte als rein deskriptive Größe zur Beschreibung der veränderten Angebotsqualität. Ein Beispiel ist die Messung einer veränderten Erschließungsqualität nach umgesetzten Anpassungen im Haltestellennetz. Über Erreichbarkeitsindikatoren können aber auch der unmittelbare wirtschaftliche Nutzen oder die verbesserten individuellen Interaktionsmöglichkeiten abgebildet werden. Beispielsweise lässt sich die Mobilität unterschiedlicher Personengruppen in Abhängigkeit von der Raumstruktur vergleichen. Erreichbarkeit dient hier nicht als deskriptive Größe, sondern der Ableitung sich unmittelbar aus der Entwicklung des Landnutzungs- und Verkehrssystems ergebender

Größen. Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten erfordern jedoch unterschiedliche Berechnungsverfahren. In diesem Abschnitt werden unterschiedliche Verfahren zur Erreichbarkeitsberechnung vorgestellt und hinsichtlich ihrer praktischen Relevanz und Nutzbarkeit verglichen.

2.1.1 Zur Historie der Erreichbarkeitsmessung

Der Umgang mit Erreichbarkeit geht bereits auf eine mehrere Jahrzehnte andauernde wissenschaftliche Auseinandersetzung und praktische Anwendung zurück. Eines der ersten Anwendungsbeispiele ist der Generalregulierungsplan für Wien von 1893 (Wagner 1893). Damals wurden Isolinien mit einfachen technischen Mitteln um mögliche innerstädtische Knotenpunkte gezogen, die aufgrund ihrer Bevölkerungs- und infrastrukturellen Dichte ein spezifisches Ortsgefühl generieren sollten (Koerner 2017, S. 40). Zwar wurde der Begriff der Erreichbarkeit seinerzeit noch nicht verwendet, dennoch trat ein Verständnis des Zusammenwirkens von Raumnutzung und Mobilität zutage, welches später gemeinsam unter Erreichbarkeit subsumiert wurde.

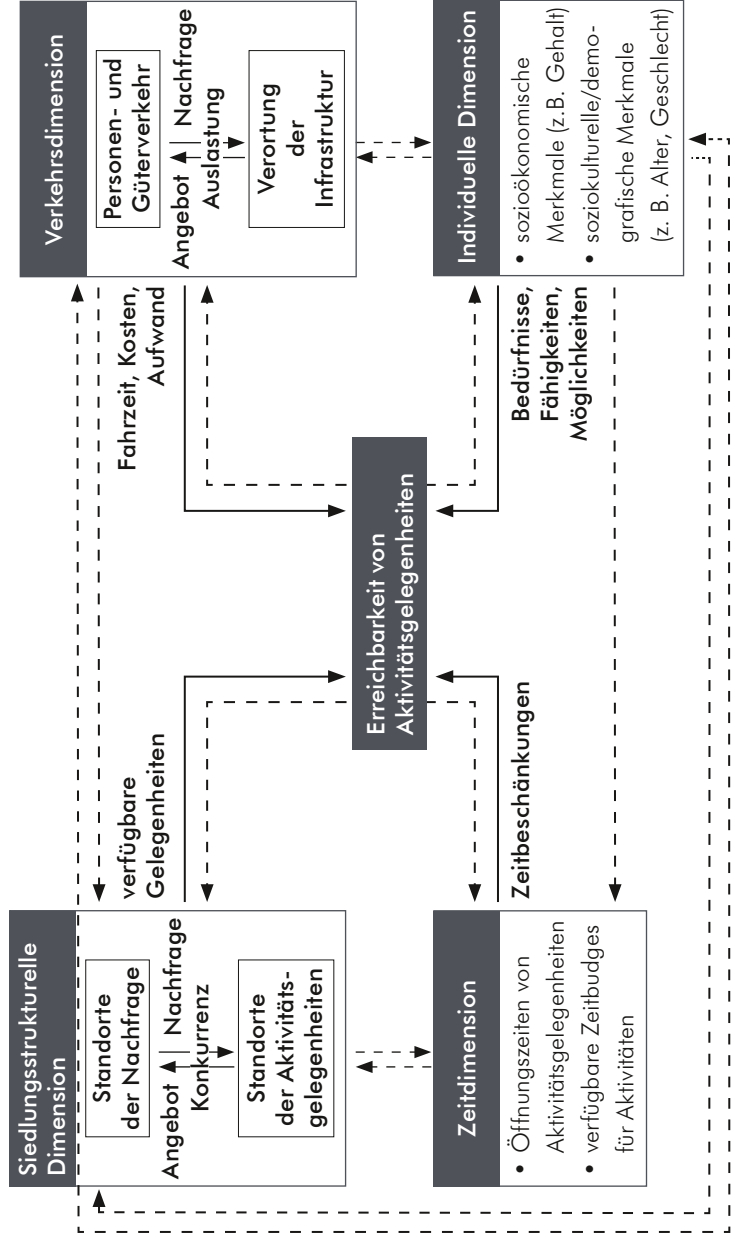
Die ersten Anfänge einer wissenschaftlichen Auseinandersetzung gehen zurück auf die 1940er Jahre. Unter den Stichworten der *demographic gravitation* und des *population potentials* wurden erste Ansätze entwickelt, die die Attraktivität von Orten über die Entfernung zu anderen Gebieten und deren Einwohnerzahl bewerten (Stewart 1941; Stewart 1948). Demnach ist das Bevölkerungspotenzial eines Punktes die Entfernung zu allen anderen Personen (Stewart 1941, S. 89). Es handelt sich um eine erste Form des Erreichbarkeitspotenzials, welches Hansen (1959) rund zwanzig Jahre später konkretisierte. Sein Ansatz ermöglicht eine integrierte Betrachtung des Verkehrsangebotes und der Landnutzung. Er beschreibt ein Konzept zur Erreichbarkeitsmessung auf Basis der räumlichen Verteilung von Gelegenheiten sowie der Möglichkeit und des Willens, diese zu erreichen (ebd., S. 73). Hansen war es auch, der in diesem Zusammenhang explizit eine Verbindung zwischen der räumlichen Entfernung, der Zielattraktivität sowie des realisierbaren Nutzens der Raumüberwindung auf Basis des Gravitationsansatzes herstellte. Je leichter ein Ziel zu erreichen ist und je mehr Gelegenheiten dieses enthält, desto eher wird dieses Ziel aufgesucht.

Ein häufig verwendetes Begriffsverständnis von Erreichbarkeit unterscheidet zwischen der relativen Erreichbarkeit als dem Raumwiderstand zwischen zwei Punkten und der integralen Erreichbarkeit als dem Raumwiderstand zwischen einem Punkt und allen Zielen in einem Gebiet (Ingram 1971, S. 101, 102). Dalvi & Martin (1976) definieren Erreichbarkeit in diesem Zusammenhang als die Leichtigkeit, mit der Personen unterschiedliche Gelegenheiten erreichen können. Dieser Ansatz enthält unterschiedliche Facetten von Erreichbarkeit. Die Verwendung dieser Definition ist bis heute verbreitet, wenngleich sich bislang kein allgemeingültiges Begriffsverständnis durchgesetzt hat.

Seit den 1980er Jahren wird Erreichbarkeit nicht nur als Ausdruck räumlicher Interaktion, sondern auch als ihre Möglichkeitsform interpretiert. Erreichbarkeit ist demnach die Möglichkeit zur räumlichen Interaktion (Pooler 1987, S. 274). Dieses Verständnis ermöglicht eine engere Verbindung mit dem Mobilitätsbegriff. Demnach beschreibt Mobilität die individuellen und Erreichbarkeit die raumstrukturellen Faktoren zur Hemmung und Begünstigung von Ortsveränderungen (vgl. Abschnitt 1.2). Im Zentrum von Erreichbarkeit steht nun also, wo und in welchem Umfang unterschiedlich konstituierte Individuen ihren Bedürfnissen außerhalb des eigenen Wohnstandortes nachgehen können. Anfang der 2000er Jahre wurde in den Arbeiten von Geurs, Ritsema van Eck & van Wee (2001; 2004) eine bis heute vielfach verwendete Differenzierung unterschiedlicher Verfahren der Erreichbarkeitsmessung vorgenommen (vgl. Abschnitt 2.1.3). Demnach ist zwischen standortbasierten, personenbasierten, infrastrukturbasierten und nutzenbasierten Erreichbarkeiten zu unterscheiden. Die Differenzierung von Erreichbarkeitsindikatoren erfolgt über die siedlungsstrukturelle, die zeitliche, die verkehrliche und die individuelle Dimension (vgl. Abbildung 9).

Die siedlungsstrukturelle Dimension bzw. die Landnutzung beinhaltet das im Raum verteilte Gelegenheitsangebot. Ihr ist außerdem die sich aus individuellen Faktoren ergebende Nachfrage nach diesen Gelegenheiten zugeordnet. Über die Verkehrsdimension werden die Raumwiderstände abgebildet. Zudem lässt sich die individuelle Dimension mit Hilfe von Erreichbarkeit adressieren. Ihr sind neben sozioökonomischen und soziodemographischen Merkmalen auch unterschiedliche mobilitätsbezogene Bedürfnisse zugeordnet. In den letzten zwanzig Jahren gewann

Abbildung 9: Dimensionen der Erreichbarkeit



Quelle: Altenburg et al. (2009, S. 9); nach Geurs & Ritsema van Eck (2001, S. 28) sowie Geurs & van Wee (2004, S. 129)

die von Dalvi & Martin (1976) noch ausgeklammerte zeitliche Dimension eine zunehmende Beachtung. Dieser sind unter anderem die Öffnungszeiten der Gelegenheiten, die Zeitbudgets von Personen und tageszeitabhängige Raumwiderstände zugerechnet. Öffnungszeiten haben sich jedoch, von Ausnahmen abgesehen (Farber *et al.* 2014; Lei & Church 2010), bisher nicht als maßgeblicher Bestandteil von Erreichbarkeitsanalysen durchgesetzt. Auch die Zeitbudgets von Personen werden bisher nur in Ausnahmefällen, etwa im Zusammenhang mit Aktivitätenketten, in Erreichbarkeitsanalysen berücksichtigt (Liao *et al.* 2014). Wesentlich verbreiteter ist indes die Integration von Fahrplanzeiten des ÖPNV (Farber *et al.* 2016; Fransen *et al.* 2015; Stępniaik & Goliszek 2017).

Immer wieder wird die Operationalisierung von Erreichbarkeit kritisch hinterfragt. Nach Shen *et al.* (2012, S. 158) müssen Personen die Möglichkeit bekommen, die von ihnen nachgefragten Gelegenheiten zu erreichen. Sie betonen aber auch, dass mobilitätsbezogene Erreichbarkeitsindikatoren die starke Tendenz besitzen, auf eine deutliche Erhöhung der Geschwindigkeit positiv zu reagieren. Entsprechend werden aus diesen Indikatoren primär Maßnahmen abgeleitet, die eine Reduzierung der Raumwiderstände und damit eine Ausweitung der Verkehrsleistung mit sich bringen. Geschwindigkeit wird so zum übergeordneten Ziel der Erreichbarkeitsplanung. Auch Martens (2014) fordert die Abkehr von der bloßen Bereitstellung neuer Verkehrsinfrastrukturen mit höheren Kapazitäten und Geschwindigkeiten, hin zu einem an den Bedürfnissen der Menschen ausgerichteten Entwicklung des Verkehrs- und Landnutzungssystems. Diese Verschiebung erfordert die Einführung neuer Planungskonzepte und Analysemethoden. Mit diesem Paradigmenwechsel soll die Entwicklung des Verkehrs- und Landnutzungssystems eine verträglichere Realisierung von Mobilität ermöglichen. Zu ihren Instrumenten gehören die Verkehrsvermeidung, die Verkehrsverlagerung und eine verträglichere Verkehrsabwicklung (Holz-Rau 2009, S. 797). Dabei bezieht sich die verträglichere Realisierung nicht nur auf den Umweltaspekt bzw. die Gesamtheit externer Effekte, sondern auch auf das Gebiet der gesellschaftlichen Teilhabe (Altenburg *et al.* 2009), auf den demographischen Wandel (Deutscher Bundestag 2007, S. 4) und die Begrenztheit staatlicher Finanzmittel. Insofern kann eine Hinwendung zu einer an den Mobilitätsbedürfnissen der Bevölkerung ausgerichteten

Planung den Umweltschutz verbessern, die soziale Teilhabe erhöhen und zu einer kosteneffizienteren Verkehrsabwicklung führen.

2.1.2 Die Relevanz von Erreichbarkeitsindikatoren in regionalen Modellen

Die in einer Erreichbarkeitsanalyse verwendeten Erreichbarkeitsindikatoren stellen unterschiedliche Anforderungen an das zugrundeliegende Modell. Sie sind eine auf die Fragestellung und den Einsatzzweck abgestellte Operationalisierung unterschiedlicher Erreichbarkeitsdefinitionen. Nach Wegener *et al.* (2001) können insgesamt zehn Elemente abgegrenzt werden, die den Modellaufbau und die Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren wesentlich beeinflussen. Zu diesen gehören beispielsweise die Raumeinheiten und Gelegenheiten, die Verkehrsmodi und Verkehrsmittel aber auch die Raumwiderstände und der räumliche Maßstab (ebd., S. 9). Ein Großteil dieser Elemente wird vom Untersuchungsgegenstand vorgegeben. Etwa das Untersuchungsgebiet, die räumliche Auflösung, die betrachteten Verkehrsmodi oder etwaige räumliche Restriktionen. Doch auch Erreichbarkeitsindikatoren beeinflussen die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen und die Aussagekraft der erzielten Ergebnisse (vgl. Abschnitt 1.6). Die Nutzbarkeit wird insbesondere dann reduziert, wenn die verwendeten Indikatoren zu einer deutlichen Erhöhung der Rechenzeiten führen und Echtzeitberechnungen verhindern. Auch kann eine hohe Individualisierung von Raumwiderständen nur umgesetzt werden, wenn bei der Modellentwicklung das notwendige Expertenwissen vorhanden ist. Schließlich zeigt sich immer wieder, dass nur wenige Erreichbarkeitsindikatoren in der Planungspraxis wirklich verstanden und eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 1.3). Auf der anderen Seite muss gewährleistet sein, dass die Erreichbarkeitsverhältnisse der Theorie entsprechend korrekt abgebildet werden, die Erreichbarkeitsindikatoren also eine hohe Genauigkeit besitzen. Beide Faktoren werden im Wesentlichen von den folgenden Modellparametern bestimmt:

1. Menge der Raumeinheiten und Gelegenheiten
2. Raumwiderstände und Menge der Verbindungen
3. zeitliche und individuelle Faktoren

Nachfolgend wird die Bedeutung dieser Faktoren näher beschrieben. Vor diesem Hintergrund erfolgt anschließend eine Vorstellung unterschiedlicher Indikatoren. Anzumerken ist, dass auch die Auflösung des Raumbezugssystems, die berücksichtigten Verkehrsmodi sowie die Detaillierung der Verkehrsgraphen einen großen Einfluss auf die Nutzbarkeit und Genauigkeit von Erreichbarkeitsmodellen haben. Sie resultieren jedoch nicht primär aus den genutzten Indikatoren und werden daher gesondert in den Abschnitten 2.1.4 und 2.3 diskutiert.

Menge der Gelegenheiten

Erreichbarkeitsindikatoren werden für die Raumeinheiten (Rasterzellen, Gemeinden etc.) des jeweiligen Raumbezugssystems berechnet (vgl. Glossar). Die Menge der Gelegenheiten ist relevant für die Rechenzeit, die Datenbereitstellung und -haltung, sowie die Komplexität der Berechnungsroutine. Die Nutzbarkeit eines Modells nimmt mit einer Zunahme der Gelegenheiten tendenziell ab. Daher werden in regionalen und insbesondere nationalen Modellen die Gelegenheiten häufig über wenige zentrale Orte zusammengefasst (ÖROK 2018; Pütz & Schönfelder 2018; Buthe *et al.* 2018). Gleichwohl werden auch in regionalen Modellen zunehmend Reiseaufwandsindikatoren verwendet, um die Raumwiderstände zur nächsten Einrichtung eines Gelegenheitstyps zu berechnen (BBSR 2019; Spiekermann & Schwarze 2014; Wulforth *et al.* 2010).

Menge der Verbindungen

Die Nutzbarkeit nimmt zusätzlich ab, wenn nicht nur die nächste Gelegenheit berücksichtigt wird, sondern Raumwiderstände zu mehreren Gelegenheiten zusammengefasst werden. Mit Reiseaufwandsindikatoren können akkumulierte Kosten zu einer Menge an Gelegenheiten berechnet werden. Ein Beispiel für die Akkumulation von Kosten ist der ATOS-Indikator (Access to opportunities and services). Dieser beinhaltet etwa die durchschnittliche Reisezeit zu den nächsten drei Hausärzten oder zu den nächsten 10 Tsd. Arbeitsplätzen (Inayathusein & Cooper 2018, S. 24). Es lassen sich aber auch verschiedene Gelegenheiten zusammenfassen. Kumulationsindikatoren ermöglichen hingegen das Aufsummieren aller Gelegenheiten, die ohne Überschreitung eines maximalen Raumwiderstandes erreicht werden. Beispielsweise die Menge der innerhalb von 30 Minuten erreichbaren Arbeitsplätze. Da in beiden Fällen mehrere

Verbindungen zu berechnen und zu verarbeiten sind, werden solche Indikatoren mit regionalen Modellen nur selten berechnet, insbesondere bei Verwendung einer hohen räumlichen Auflösung (Owen *et al.* 2017; Owen & Levinson 2012).

Zahlreiche Erreichbarkeitsindikatoren kommen auch ohne Raumwiderstände aus. Zu diesen gehören unter anderem Ausstattungsindikatoren, die die Beschreibung des Verkehrsnetzes (Anzahl der Haltestellen, Linienlänge etc.) ermöglichen und die Attraktivität eines Standortes oder eines Gebietes über die räumliche Lage von Verkehrsinfrastrukturen bewerten (Schwarze 2015, S. 47). Dazu gehört auch die Anzahl der Haltestellen je Gemeinde (Pütz & Schönfelder 2018, S. 6) oder die Anzahl der Einwohner je Hausarzt. Die Vorteile solcher Indikatoren sind die schnelle Berechnung über einfache räumliche Abfragen und die gute Interpretierbarkeit (vgl. Abschnitt 2.1.3.1).

Zeitliche und individuelle Faktoren

Die Widerstandsberechnung auf Start-Ziel-Paaren oder Start-Ziel-Relationen ist die klassische Grundlage bei der Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren (Hesse *et al.* 2012, S. 26; Schwarze 2015, S. 219). Dies bedeutet, dass je Raumeinheit nur Wege zu einer bestimmten Menge an Gelegenheiten und ohne Unterbrechung ermittelt werden. Auch zeitliche Rahmenbedingungen spielen nur eine Rolle, wenn sie für die zu berechnenden Verbindungen relevant sind (Straßenbelastung, Fahrplanzeit etc.). Es existieren aber auch Erreichbarkeitsindikatoren, die eine Integration zeitlicher und individueller Faktoren ermöglichen. Ihnen ist die zumeist deutliche Erhöhung des Berechnungsaufwands gemein.

So wird immer wieder das Fehlen von Aktivitätenketten in Erreichbarkeitsanalysen kritisiert (Kwan 1998, S. 192; Owen & Levinson 2012, S. 6). Dieser Kritik liegt die Überlegung zugrunde, dass die meisten Wege nicht an der Wohnungstür beginnen, sondern nur in Kombination mit anderen Aktivitäten sinnvoll abgebildet werden können. Ziel ist es also, die Erreichbarkeit in Abhängigkeit von individuellen Tagesabläufen zu berechnen. Zwar existieren unterschiedliche Ansätze, um auch wegkettenbasierte Erreichbarkeitsindikatoren zur Anwendung zu bringen, ihre Nutzbarkeit wurde bisher jedoch nur anhand kleinerer Gebiete demonstriert (Liao *et al.* 2013a; Liao & van Wee 2017). Eine weitere

Möglichkeit ist die Integration individueller Wegeketten (vgl. Glossar) mit Hilfe der Berechnung der joint accessibility. Mit dieser wird das Gebiet abgegrenzt, in dem sich zwei Personen in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Tagesabläufe und unter Berücksichtigung von Zeitbudgets treffen können (Neutens *et al.* 2008). Doch erfordern auch solche Analysen den Aufbau komplexer Erreichbarkeitsmodelle. Ein weiterer Nachteil wegketten-basierter Erreichbarkeitsindikatoren ist ihre eingeschränkte Interpretierbarkeit aufgrund der hohen Aggregation von Raumwiderständen.

2.1.3 Kategorien von Erreichbarkeitsindikatoren

Geurs & van Wee (2004) leiten ihre Systematik über vier Erreichbarkeitskomponenten ab und Schwarze (2015, S. 43) unterscheidet zwischen einfachen und komplexen Erreichbarkeitsindikatoren. Einfache Erreichbarkeitsindikatoren dienen demnach der Bewertung des Verkehrs- und Aktivitätsangebotes in einem Gebiet. Komplexe Indikatoren zeigen hingegen die Realisierbarkeit von Aktivitäten. Weitere Systematiken zur Kategorisierung von Erreichbarkeitsindikatoren entwickelten unter anderem Lei & Church (2010), Kwan (1998), Hesse *et al.* (2012) und Schürmann *et al.* (1997). In dieser Arbeit werden die nachfolgenden Erreichbarkeitsindikatoren unterschieden. Das wesentliche Unterscheidungskriterium bildet die Menge der zu berechnenden Verbindungen.

- einfache und infrastrukturbasierte Erreichbarkeitsindikatoren
- komplexe und standortbasierte Erreichbarkeitsindikatoren
- personenbasierte Erreichbarkeitsindikatoren

2.1.3.1 Einfache und infrastrukturbasierte Erreichbarkeitsindikatoren

Wenn das bloße Vorhandensein eines Aktivitätsangebotes überprüft, die Qualität und Zugänglichkeit zum Verkehrssystem untersucht und die Verbundenheit von zwei Orten überprüft werden, kommen einfache und infrastrukturbasierte Erreichbarkeitsindikatoren zum Einsatz. Nachfolgend werden unterschiedliche Indikatoren aus dieser Gruppe vorgestellt. Da es sich um einfach zu berechnende und zu interpretierende Indikatoren handelt, ist ihre Anwendung in regionalen Modellen prinzipiell

naheliegend. Gleichwohl ergeben sich erhebliche Einschränkungen in der realistischen Abbildung von Mobilitätsräumen aufgrund des Fehlens räumlicher Interaktionen zwischen Aktivitätsstandorten (Schwarze 2015, S. 46).

Ausstattungsindikatoren

Mit Ausstattungsindikatoren wird die Lagegunst eines Ortes über das Vorhandensein und die Qualität des Verkehrs- und Aktivitätsangebotes operationalisiert (ebd., S. 47). Auf internationaler Ebene wird die Qualität des Verkehrssystems mit Hilfe der »*infrastructurebased measures*« beschrieben (Geurs & Ritsema van Eck 2001, S. 47; Geurs & van Wee 2004, S. 128). Zu diesen Qualitäten gehören beispielsweise die Anzahl an Haltestellen und Parkplätzen oder die Länge von Autobahnen und Schnellbahnen. Auch die Durchschnittsgeschwindigkeiten, Fahrtenhäufigkeiten oder Kapazitäten auf ÖPNV-Linien können über Ausstattungsindikatoren abgebildet werden. Analog dazu wird mit Aktivitätsstandorten verfahren. Ausstattungsindikatoren zeigen unter anderem, ob und in welcher Menge Hausärzte in einem Landkreis verfügbar sind.

Ausstattungsindikatoren werden mit Hilfe einfacher Abfragen oder Aggregationen berechnet. Ein Routing erfolgt nicht, was wiederum das Modell vereinfacht und das notwendige Expertenwissen reduziert. Außerdem können räumliche Abfragen selbst auf nationaler Ebene innerhalb weniger Sekunden durchgeführt werden. Das BBSR hat für alle Gemeindeverbände in Deutschland beispielsweise die Menge der ÖV-Abfahrten in Relation zur Einwohnerzahl oder die Menge an Haltestellen im Verhältnis zur Gebietsgröße ermittelt (Pütz & Schönfelder 2018, S. 6ff.). Solche Indikatoren zeichnen sich durch ihre gute Interpretierbarkeit durch die Praxisanwender aus. Zu bedenken ist aber, dass die Festlegung des Untersuchungsraumes und die Einteilung des Raumbezugssystems einen starken Einfluss auf die Erreichbarkeitswerte haben (Schwarze 2015, S. 48).

1-zu-1-Relationen oder die einfache Routensuche

Nach Kwan (1998, S. 192) dienen einfache Erreichbarkeiten der Bewertung der Verbindung zwischen zwei Orten. Dies ist, von Ausstattungsindikatoren abgesehen, die einfachste Möglichkeit der Erreichbarkeitsberechnung. Ihre Anwendung ist zumeist auf den Privatgebrauch beschränkt.

Ein denkbarer Anwendungsfall in der Planungspraxis ist die Berechnung des Raumwiderstandes zwischen dem Hauptbahnhof und einem neuen Wohnungsbauprojekt.

System accessibility

Die Zugänglichkeit des Verkehrssystems wird über die system accessibility bewertet (Lei & Church 2010, S. 284). Im Rahmen der Nahverkehrsplanung kommt sie häufig in Form der Erschließungsqualität zur Bewertung des ÖV-Angebotes zum Einsatz (vgl. Abschnitt 4.2.1). Zur system accessibility gehören unter anderem die Berechnung der Reisezeit zur nächsten Haltestelle oder die Abbildung von Haltestelleneinzugsgebieten über Isochronen. Gleichwohl können diese Maßzahlen auch den Distanz und Reiseaufwandsindikatoren (Abschnitt 2.1.3.2) zugerechnet werden (Schwarze 2015, S. 50). Anders als Reiseaufwandsindikatoren, bewertet die system accessibility ausschließlich die Erreichbarkeit von Verkehrsknoten und nicht von Gelegenheiten. Die Wahl des Routingverfahrens wird dadurch nicht beeinflusst. Gleichzeitig kann die arbeitsaufwendige Bereitstellung von Raumstrukturdaten entfallen. Gerade im regionalen Kontext kann sich der Modellierungsaufwand erheblich reduzieren.

Die häufige Bewertung der Erschließungsqualität mit Hilfe der system accessibility ist also nicht verwunderlich, um die Erreichbarkeit des öffentlichen Verkehrssystems auf regionaler oder nationaler Ebene abzubilden. Da keine Raumwiderstände im öffentlichen Verkehrssystem berechnet werden, ist der Einsatz von Fahrplandaten überflüssig. Auf nationaler und internationaler Ebene lassen sich unterschiedliche Einsatzzwecke identifizieren. Beispielsweise erfolgt in der Schweiz die flächendeckende Berechnung von ›ÖV-Güteklassen‹ über Luftliniendistanzen zu nächsten Haltestellen und die Häufigkeit der Haltestellenbedienung (ARE 2010, S. 9ff.). Daran angelehnte Ansätze werden seit einigen Jahren auch in Österreich und von der europäischen Kommission verfolgt, um die Qualität des ÖPNV-Angebots landesweit und flächendeckend abzubilden (Hiess 2017, S. 12ff.; Poelman & Dijkstra 2015, S. 13). Analog zum Walk Score® wird in zahlreichen Städten außerdem ein Transit Score® berechnet, welcher ebenfalls auf der Haltestellenanbindung und Fahrtenhäufigkeit basiert (Herst 2010; Jacobson 2010).

Der entscheidende Nachteil der system accessibility ist, dass keine Aussagen hinsichtlich der Erreichbarkeit konkreter Gelegenheiten getroffen werden. So wird unter dem Stichwort der Gerechtigkeit im Verkehr darauf hingewiesen, dass die Raumwiderstände zwischen den Wohnquartieren unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen einerseits und den Gelegenheiten andererseits häufig ungleich verteilt sind (Tribby & Zandbergen 2012, S. 346; Kaplan *et al.* 2014, S. 82). In diesem Zusammenhang wird mitunter eine vertikale Gerechtigkeit eingefordert, also Ausrichtung des Verkehrsangebotes an den Bedürfnissen besonders gefährdeter Bevölkerungsgruppen (El-Geneidy *et al.* 2016, S. 303). Der system accessibility liegt jedoch ein verkürzter Fokus auf die räumliche Verteilung von Zugangsknoten zugrunde, welche nur einen Teil des tatsächlichen Verkehrsangebotes darstellen.

2.1.3.2 Komplexe und standortbasierte Erreichbarkeitsindikatoren

Komplexe Messkonzepte basieren auf einem Verständnis von Erreichbarkeit, welches die Realisierbarkeit von Aktivitäten ins Zentrum rückt (Geurs & van Wee 2004, S. 128; Handy & Niemeier 1997, S. 1175; Kwan 1998, S. 192). Diese Realisierbarkeit hängt auch davon ab, ob und mit welchem Aufwand unterschiedliche Gelegenheiten von Standorten zu erreichen sind. In der englischen Literatur wird auch die standörtliche Erreichbarkeit (locationbased accessibility) genannt (Geurs & van Wee 2004, S. 129). Erreichbarkeit wird in diesem Zusammenhang als die Eigenschaft von Standorten definiert, die sich aus der Menge erreichbarer Ziele ergibt (Kwan 1998, S. 192). Wie bereits in Abschnitt 1.2 ausgeführt, ist die standörtliche Erreichbarkeit allein nicht ausreichend, um die Möglichkeiten zur Bedürfnisbefriedigung außerhalb der eigenen Wohnung vollständig zu erfassen. Gleichwohl kann mit komplexen Erreichbarkeitsindikatoren ermittelt werden, welche Raumwiderstände überwunden werden müssen, um notwendige Ortsveränderungen zu realisieren. Zu den am häufigsten eingesetzten Erreichbarkeitsindikatoren gehören Raumwiderstands-, Kumulations- und Potenzialindikatoren (Geurs & van Wee 2004, S. 132; Schwarze 2015, S. 54). Gerade auf regionaler und nationaler Ebene ist die Verwendung dieser Indikatoren allgegenwärtig (BBSR o.J.b; Pütz & Schönfelder 2018). Komplexe Erreichbarkeitsindikatoren sind in der

Planungspraxis also von großer Bedeutung. Gleichzeitig stellen sie erhebliche Anforderungen an die Erreichbarkeitsmodellierung, da sie, anders als die einfachen Erreichbarkeitsindikatoren, immer auf Raumwiderständen basieren, die zumeist mehr oder weniger detaillierten Verkehrsgraphen entstammen. Hinzu kommt, dass Kumulations- und Potenzialindikatoren immer eine Routensuche von prinzipiell unendlich vielen Raumeinheiten zu jeweils unendlichen Gelegenheiten erfordern (n-zu-n-Relationen).

Reiseaufwandsindikatoren

Die akkumulierten Raumwiderstände zwischen Standorten und einer definierten Menge an Gelegenheiten werden als Reiseaufwandsindikatoren berechnet (Schwarze 2015, S. 55). Es besteht beispielsweise die Möglichkeit, die minimale Reisezeit zum nächsten Hausarzt oder die durchschnittliche Reisezeit zu den nächsten 1 Tsd. Arbeitsplätzen zu berechnen. Beide Anwendungsbeispiele unterscheiden sich bezüglich der Interpretierbarkeit und der Berechenbarkeit. Lei & Church (2010, S. 285) verwenden eine identische Abgrenzung unter dem Begriff der *system facilitated accessibility*. In der englischsprachigen Literatur erfolgt aber zumeist eine Unterscheidung zwischen *distance measures* und *contour measures* (Geurs & Ritsema van Eck 2001, S. 49ff.). *Distance measures* werden verwendet, um den minimalen Raumwiderstand zwischen einer Raumeinheit und dem nächsten Standort eines Gelegenheitstyps abzubilden. *Contour measures* dienen hingegen der Widerstandsberechnung zwischen einer Raumeinheit und mehreren Gelegenheiten (Geurs & van Wee 2004, S. 133). Dies ist auch bei der Berechnung von Kumulations- und Potenzialindikatoren der Fall. Da jedoch der minimale Raumwiderstand zu einem Gelegenheitstyp ebenso aus einer Menge zahlreicher Relationen ausgewählt wird, ist die Unterscheidung zwischen *distance* und *contour measures* methodisch nicht schlüssig und das Begriffsverständnis des Reiseaufwandsindikators vorzuziehen. Innerhalb der Reiseaufwandsindikatoren sind allerdings zwei Untergruppen zu unterscheiden:

1. minimale Reiseaufwandsindikatoren – Berechnung von Raumwiderständen zu nächsten Gelegenheiten
2. zusammengefasste Reiseaufwandsindikatoren – Berechnung der gewichteten Raumwiderstände zu einer definierten Menge an nächsten Gelegenheiten

Minimale Raumwiderstände haben den Vorteil, dass sie von den Anwendern leicht zu interpretieren und außerdem einfach zu berechnen sind. Vorab sind jedoch die Raumwiderstände zu mehreren Gelegenheiten zu ermitteln. Aus diesen wird anschließend der minimale Raumwiderstand ausgewählt. Insofern ist bei der Darstellung und Interpretation der Ergebnisse ausschließlich auf n-zu-1-Relationen zurückzugreifen. Entsprechend wird allen Raumeinheiten jeweils nur eine Gelegenheit zugeordnet. Die Berechnung und Ausgabe von n-zu-1-Relationen bedeutet jedoch auch, dass die Zielaktivitäten genau verortet sein müssen, da jeder Datenfehler den Indikatorwert stark beeinflusst.

Die genannten Eigenschaften führen dazu, dass in vielen Erreichbarkeitsanalysen auf regionaler und nationaler Ebene der Reiseaufwand zu nächstgelegenen Einrichtungen die entscheidende Bewertungsgrundlage bildet (Boisjoly & El-Geneidy 2017b, S. 40; Proffitt *et al.* 2019, S. 185). Beispielsweise werden im Raumordnungsbericht des Jahres 2017 die Raumwiderstände zu nächstgelegenen Supermärkten, Grund- und weiterführenden Schulen ausgewiesen (BBSR 2017, S. 45, 71ff.). Auch im Erreichbarkeitsmodell der Europäischen Metropolregion München und im deutschlandweiten Modell des Thünen-Instituts für Ländliche Räume (Braunschweig) kommen diese Indikatoren zum Einsatz (Büttner *et al.* 2018; Neumeier 2013; Neumeier 2017; Wulfhorst *et al.* 2010). Und schließlich beziehen sich auch die landesweiten und kleinräumigen Erreichbarkeitsanalysen für Österreich nahezu ausschließlich auf nächstgelegene zentrale Orte (ÖROK 2018). Das in dieser Arbeit entwickelte regionale Erreichbarkeitsmodell ermöglicht ebenfalls die Berechnung minimaler Reiseaufwandsindikatoren für insgesamt drei unterschiedliche Gelegenheitstypen (vgl. Abschnitt 3.6).

Minimalen Raumwiderständen liegt ein Verständnis zugrunde, nach dem alle Zielaktivitäten prinzipiell substituierbar sind. Bei substituierbaren Gelegenheiten ist folglich die Erreichbarkeit der nächstgelegenen Einrichtung eines bestimmten Aktivitätstyps entscheidend. Dieses Begriffsverständnis spielt in der Daseinsvorsorge eine große Rolle, da Gelegenheiten wie Schulen, Hausärzte und Supermärkte grundsätzlich substituierbar sind. Im Rahmen der Nahversorgung ist für das BBSR »[...] vor allem ausschlaggebend, ob diese Angebot für die Bewohner nahe am Wohnort erreichbar sind« (Burgdorf *et al.* 2015, S.3). Anforderungen

hinsichtlich der Menge erreichbarer Gelegenheiten werden nicht genannt. Auch die »Standardvorgaben der infrastrukturellen Daseinsvorsorge« werden ausschließlich über minimale Reiseaufwandsindikatoren definiert (BMVBS 2010d). Die Annahme prinzipieller Substitute im Bereich der Daseinsvorsorge ist jedoch nicht immer stichhaltig. Im Primärbereich mag dies noch zutreffen, jedenfalls dann, wenn alle Schüler an die nächstgelegene Grundschule in ihrem Schulbezirk gebunden sind (vgl. Abschnitt 3.4.2). Doch schon Hausärzte sind nicht vollständig substituierbar, da unter anderem Öffnungszeiten und persönliche Präferenzen die Wahl eines bestimmten Hausarztes maßgeblich beeinflussen. Auch bei Supermärkten kann nicht von vollständigen Substituten ausgegangen werden, da bereits zwischen einzelnen Discountern deutliche Angebotsunterschiede bestehen, die sich bei einem Vergleich mit Vollsortimentern (Edeka, Rewe etc.) noch verstärken. So wurde beispielsweise für die San Francisco Bay Area gezeigt, dass mehr als 80% der Einwohner mehr als einen Supermarkt im Monat aufsuchen (Handy & Niemeier 1997, S. 1187).

Um hier Abhilfe zu schaffen, werden zusammengefasste oder akkumulierte Reiseaufwandsindikatoren berechnet. Diese setzen eine erhöhte Transferleistung auf Seiten der Anwender voraus. Auch ihre Berechnung erzeugt einen höheren Aufwand, da sie auf n-zu-n-Relationen basieren, also für jede Raumeinheit die Raumwiderstände zu prinzipiell unendlich vielen Gelegenheiten berechnet werden muss. Zusätzlich sind die einzelnen Raumwiderstände je Raumeinheit über eine Gewichtungsfunktion zu akkumulieren. Beispielsweise wurde für 371 Tsd. Wohnblöcke in der Region Auckland die durchschnittliche Reisezeit zu nächsten Einrichtungen aus 17 Gelegenheitstypen berechnet (Mavoia *et al.* 2012). Dabei handelt es sich um einen Anwendungsfall der sogenannten gewichteten mittleren Reisezeit, welche gerade in internationalen Untersuchungen immer wieder verwendet wird (Fayyaz & Liu 2016; Fayyaz *et al.* 2017). In regionalen Modellen kommen solche Indikatoren auch zum Einsatz, um die Vulnerabilität von Regionen gegenüber Standortschließungen aufzuzeigen (Friedrich *et al.* 2016). Die Vulnerabilität nimmt mit einem Anstieg der durchschnittlichen Reisezeit zu nächsten Gelegenheiten deutlich zu. Oft wird, beispielsweise bei Supermärkten, nicht die nächste Gelegenheit regelmäßig aufgesucht, sondern jene, die an

ohnehin regelmäßig durchgeführten Wegen (z. B. Arbeit -> Wohnen) liegt (Widener 2017, S. 363). Auch zusammengesetzte Reiseaufwandsindikatoren können solche Aktivitätsketten nicht adäquat abbilden. Widener *et al.* (2015) haben jedoch ein Verfahren entwickelt, mit dem die Erreichbarkeit von Supermärkten mit den Heimwegen von Arbeitsplätzen kombinierbar ist (vgl. auch Abschnitt 2.1.3.3).

Kumulationsindikatoren

Die Berechnung von Kumulationsindikatoren (engl. cumulative accessibility, cumulative-opportunity measure, contour measure) ist eine weitere klassische Anwendung von Erreichbarkeitsmodellen. Sie beinhalten die Anzahl der mit einem definierten Reisebudget erreichbaren Gelegenheiten (Schwarze 2015, S. 54). Mögliche Kennzahlen sind die innerhalb von 30 Minuten mit dem Pkw erreichbaren Arbeitsplätze oder die ohne Umstieg mit öffentlichen Verkehrsmitteln erreichbaren Einwohner. Kumulationsindikatoren basieren auf n-zu-n-Relationen, da sie die Raumwiderstände zwischen allen Raumeinheiten und Gelegenheiten beinhalten. Die zugrundeliegenden Zeitbudgets können Richtlinien entstammen oder auf Basis des realen Verkehrsverhaltens bestimmt werden. Beide Ansätze sind jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden und lassen sich in Deutschland nicht flächendeckend realisieren (BMVBS 2012, S. 6).

Ursprünglich entwickelt wurde dieses Instrument von Wachs & Kumagai (1973), um die Ungleichheit zwischen Bevölkerungsgruppen über die Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen und Gesundheitseinrichtungen zu bewerten. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass ein Standort je attraktiver ist, desto mehr Gelegenheiten innerhalb einer bestimmten Zeit erreicht werden können. Im Unterschied zu minimalen Reiseaufwandsindikatoren wird also nicht von einer prinzipiellen Substituierbarkeit der Gelegenheiten ausgegangen. Daher hat sich auch die Bewertung der Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen mit Hilfe von Kumulationsindikatoren etabliert (Anderson *et al.* 2013; Bhat *et al.* 2001; Boisjoly & El-Geneidy 2016). Es wird davon ausgegangen, dass die Attraktivität eines Standortes zunimmt, wenn viele Arbeitsplätze erreichbar sind, mithin das Zielpotenzial einer beliebigen Person mit einer hohen Wahrscheinlichkeit enthalten ist. Standorte können bei zunehmender Erreichbarkeit

zudem als attraktiver für Wohnstandortwechsel angesehen werden, da die Wahrscheinlichkeit steigt, dass der Arbeitsplatz potenzieller Interessenten gut erreichbar ist (Okabe 1976, S. 383).

Die geringe Sensitivität gegenüber zunehmenden Reisezeiten aufgrund des harten Abschneidens an der Budgetgrenze wird indes als ein Hauptkritikpunkt angeführt (Wegener *et al.* 2001, S. 15). Kritisiert wird außerdem die Bestimmung der Zeitbudgets, da dieses zwar an realen Bezugsgrößen ausgerichtet wird, sich von wahrgenommenen Reisezeiten jedoch mitunter erheblich unterscheidet (Curl *et al.* 2015, S. 189). Ein weiterer Kritikpunkt ist die fehlende Berücksichtigung von Konkurrenz, beispielsweise auf dem Arbeitsmarkt (Shen 1998).

Die fehlende Gewichtung von Einzelrelationen führt zu Vorteilen hinsichtlich der Rechenzeit und Interpretierbarkeit gegenüber Potenzialindikatoren (Geurs & van Wee 2004, S. 133). Die Nutzbarkeit von Kumulationsindikatoren auf regionaler Ebene wird aufgrund der Berücksichtigung zahlreicher Relationen aber dennoch erschwert. Da im Unterschied zu Reiseaufwandsindikatoren für jede Raumeinheit zahlreiche Einzelverbindungen bei der Berechnung zu berücksichtigen sind, ist ihre Verwendung auf regionaler Ebene mit einer hohen räumlichen Auflösung selten.

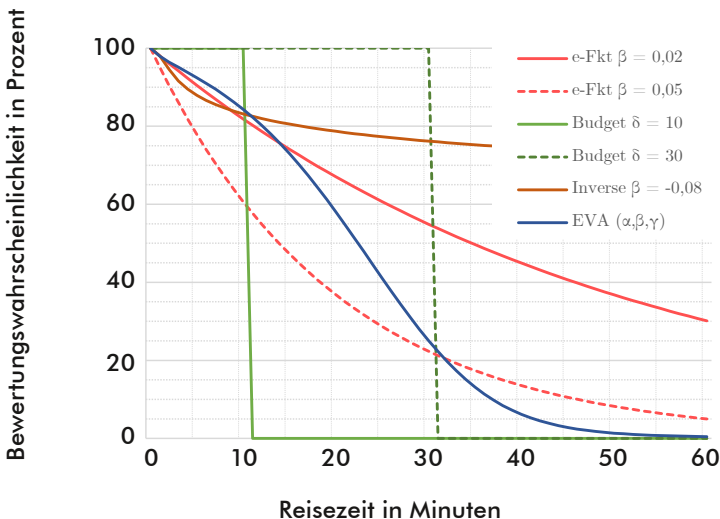
Potenzialindikatoren

Mit dem Instrument der Potenzialindikatoren ist es möglich, die Lagegunst eines Ortes über die Menge der erreichbaren Gelegenheiten zu bestimmen und diese über die Raumwiderstände zu gewichten (Schwarze 2015, S. 58). Nach Carrothers (1956, S. 94) sinkt die Wahrscheinlichkeit für eine Interaktion zwischen zwei räumlich getrennten Individuen direkt proportional zum zu überbrückenden Raumwiderstand. Hansen hat diesen Gedanken auf das Gravitationsgesetz übertragen. Demnach entspricht die Erreichbarkeit eines Punktes dem gewichteten Raumwiderstand zu allen Gelegenheiten und deren jeweiliger Attraktivität (Hansen 1959, S. 73). Auch hier sind n-zu-n-Relationen zu berücksichtigen. Zusätzlich ist jede Verbindung separat zu gewichten. Dieser Unterschied ist insofern bedeutsam, als dass sich die Interpretierbarkeit der Ergebnisse wesentlich reduziert. Zudem müssen geeignete Gewichtungs- oder Widerstandsfunktionen ermittelt und diese Gewichtungen im Modell

umgesetzt werden. Die geringe Nutzbarkeit von Potenzialindikatoren wird daher auch mit ihrer theoretischen Herleitung begründet (Geurs & Ritsema van Eck 2001, S. 135).

Nach Kwan (1998, S. 200ff.) können drei Ansätze zum Aufbau der Widerstandsfunktion unterschieden werden. Der Regelfall ist die negativ gewichtende Exponentialfunktion (Beria *et al.* 2017; Benenson *et al.* 2017b; Anderson *et al.* 2013). Gleichwohl ist auch die Verwendung von inversen Potenzfunktionen, Gauß'schen Widerstandsfunktionen oder zusammengesetzten Funktionen möglich (Hesse *et al.* 2012, S. 7ff.; Kwan 1998, S. 194ff.). Unabhängig davon ist festzulegen, auf welchem Raumwiderstand die Gewichtung basiert. Dabei ist die Verwendung der Reisezeit gegenüber der Reiseweite vorzuziehen, da sie das reale Reiseverhalten wesentlich stärker beeinflusst (Handy & Niemeier 1997, S. 1179). Möglich ist auch die Verwendung generalisierter, zahlreicher Raumwiderstände umfassender Transportkosten (Koopmans *et al.* 2013, S. 155). Die spezifische Gewichtung von Raumwiderständen wird in der Regel über Beobachtungen und Befragungen empirisch abgeleitet.

Abbildung 10: Unterschiedliche Komulations- und Potenzialindikatoren



Quelle: eigene Darstellung

In Abbildung 10 ist die Bewertungswahrscheinlichkeit (Gewichtung) einer Zielgröße in Abhängigkeit von der Reisezeit für unterschiedliche Widerstandsfunktionen dargestellt. Die Bewertungswahrscheinlichkeit gibt den Anteil der bei der Kumulation berücksichtigten Zielpotenziale an. Von einem nach 10 Minuten erreichten Unternehmen mit 200 Arbeitsplätzen fließen bei einer negativ exponentiellen Gewichtung der Reisezeit mit einem Betawert von 0,05 insgesamt 120 Arbeitsplätze (60%) in das Erreichbarkeitspotenzial.

Ein entscheidender Vorteil von Potenzialindikatoren ist, dass der zugrundeliegende Gravitationsansatz gemeinhin als erklärendes Konzept für Verkehr akzeptiert wird. Indes wird bemängelt, dass die widerstandsabhängige Gewichtung zu einer begrenzten Interpretier- und Erklärbarkeit führt (Geurs & Ritsema van Eck 2001, S. 54). Das Problem ist insbesondere, dass die Indikatorwerte nicht als die Gesamtheit erreichbarer Ziele oder als singulärer Raumwiderstand zu interpretieren sind (Owen & Levinson 2012, S. 5). Bemängelt wird außerdem die regelmäßige Verwendung gleicher Gewichtungsfaktoren für alle Individuen und alle Teilräume in einem Untersuchungsgebiet (Geurs & Ritsema van Eck 2001, S. 55). Im Vergleich zu Kumulationsindikatoren sind jedoch deutlich weniger Indikatoren zu berechnen, da unterschiedliche Zeitbudgets entfallen. Interessant ist zudem die starke Korrelation zwischen Potenzial- und Kumulationsindikatoren (Kwan 1998, S. 204, 205). Vor diesem Hintergrund ist der Umgang mit Potenzialindikatoren kritisch zu hinterfragen.

Gelegenheiten und Konkurrenz

Mit den bisher vorgestellten komplexen Erreichbarkeitsindikatoren ist es nicht möglich, die Nachfragekonkurrenz auf Seiten der Gelegenheiten abzubilden. So wird bei der Berechnung von Reiseaufwandsindikatoren unterstellt, dass die Attraktivität eines Standortes unter anderem von der minimalen Reisezeit zur nächsten Grundschule abhängig ist. Dies bedeutet jedoch zwangsläufig eine Besserstellung städtischer Standorte, obwohl begrenzte Kapazitäten im Grundschulbereich, bei Kitas und Fachärzten die Versorgung erheblich erschweren. Dass die nächste Gelegenheit immer frei verfügbar ist, ist eine in der Realität häufig nicht haltbare Annahme.

Folglich sind Gelegenheiten hinsichtlich ihrer Kapazitäten zu unterscheiden. Einige Einrichtungen können eine nahezu unendliche Nachfrage befriedigen. Zu diesen gehören Versorgungseinrichtungen des periodischen und aperiodischen Bedarfs sowie unterschiedliche Freizeiteinrichtungen. Diesen stehen Gelegenheiten gegenüber, die jeweils nur eine begrenzte Nachfrage befriedigen können. Ein Arbeitsplatz kann nur von einer Person besetzt werden. Aber auch Schulen, Hochschulen und medizinische Einrichtungen können stark limitierte Angebote darstellen. Relevant sind diese Beschränkungen dann, wenn die bereitgestellte Kapazität niedriger ist, als die auf reisezeitminimierenden Wegen realisierbare Nachfrage. Wenn ein neuer Schulstandort den Schulweg für 300 potenzielle Schüler verkürzt aber gleichzeitig nur 100 Plätze bereitstellt, kann die ausschließliche Betrachtung eines Reiseaufwandsindikators zu Fehlinterpretationen führen.

Hesse *et al.* (2012, S. 4) empfehlen die Unterscheidung zwischen einer nach außen (outbound) und einer nach innen gerichteten Erreichbarkeit (inbound accessibility). Die outbound accessibility gibt an, wie gut alle Gelegenheiten von einem Startpunkt aus erreichbar sind. Die nach innen gerichtete Erreichbarkeit erfasst hingegen den Aufwand, mit dem eine Gelegenheit von bestimmten Raumeinheiten zu erreichen ist. Mit der nach innen gerichteten Erreichbarkeit lassen sich die Einwohner identifizieren, die einen Arzt innerhalb von 30 Minuten erreichen können. Außerdem kann mit ihr die Einwohnerzahl ermittelt werden, für die ein bestimmter Arzt der nächstgelegene ist. Diese Angaben basieren auf den bei der Berechnung von Reiseaufwandsindikatoren bereitgestellten Informationen. Anschließend ist es möglich, diese Erreichbarkeitswerte mit der Kapazität der jeweiligen Gelegenheit abzugleichen. Wenn die Kapazität erschöpft ist, muss die Zuweisung zu einem anderen Ziel erfolgen. Dies bedeutet auch, dass die Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren solange durchgeführt werden muss, bis eine ausgeglichene Konkurrenzsituation bei allen Gelegenheiten besteht. Um diese Neuverteilung durchzuführen, sind jedoch weitere nächstkürzere Wege zu berechnen. Die notwendige Berechnung von $n^*(n-zu-1)$ -Relationen, die aufwendige Berechnung und die schwierige Interpretierbarkeit führen dazu, dass Konkurrenzsituationen nur selten Gegenstand der Erreichbarkeitsberechnung sind.

Sonstige Indikatoren und Erweiterungen

Es existieren noch weitere Erreichbarkeitsindikatoren, die keiner der bisher genannten Kategorien zuzuordnen sind oder die vorgestellten Messverfahren erweitern. Ein Beispiel sind utilitybased measures, die Potenzialindikatoren um eine von Individuen abhängige Bewertung der Gelegenheiten erweitern (Ben-Akiva & Lerman 1979; El-Geneidy & Levinson 2006, S. 9). Es wird davon ausgegangen, dass eine Person jene Gelegenheit aufsucht, die ihren Nutzen unter Berücksichtigung von Raumwiderständen maximiert. Diese Nutzenmaximierung hängt auch von persönlichen Merkmalen ab. Zu diesen gehören beispielsweise das Alter, das Einkommen oder der Pkw-Besitz. Betont werden jedoch die ausgeprägte Korrelation mit nicht nutzenbasierten Indikatoren und der hohe Datenbedarf (Schwarze 2015, S. 6off.). Trotz der Vorteile hinsichtlich der theoretischen Herleitung, erscheint die Verwendung von Nutzenindikatoren unter diesen Umständen als wenig zielführend.

Erreichbarkeitsindikatoren können auch um individuelle Zeitbudgets und Öffnungszeiten ergänzt werden. Zwar steht hier die personenbasierte Erreichbarkeit im Zentrum, gleichwohl lassen sich einzelne Restriktionen auch auf komplexe Erreichbarkeitsindikatoren anwenden. Beispielsweise ermittelten Lei & Church (2010) auf Basis von Fahrplandaten den spätesten Abfahrtszeitpunkt, um zu einem Supermarkt unter Beachtung einer Mindesteinkaufszeit und der Möglichkeit einer anschließenden Rückfahrt zu gelangen. Solche Analysen sind jedoch nur für einen begrenzten Personenkreis sinnvoll durchführbar und basieren auf zahlreichen Annahmen. Hinzu kommen der hohe Bedarf an Fahrplandaten und Öffnungszeiten. Entsprechend aufwendig ist ihre Integration in regionale Erreichbarkeitsmodelle (Owen & Levinson 2012, S. 6).

2.1.3.3 Personenbasierte Erreichbarkeitsindikatoren

Standortbasierte Erreichbarkeitsindikatoren weisen zwei zentrale Nachteile auf: Erstens implizieren sie, dass sämtliche Wege am Wohnstandort beginnen oder enden (Kwan 1998, S. 195ff.). Eine Verknüpfung von Einzelwegen zu Aktivitätsketten erfolgt nicht, obwohl in deutschen Städten rund 30% aller Ausgänge (vgl. Glossar) der Durchführung von mehr als einer Aktivität dienen (Ahrens *et al.* 2015b, Tab. 13.2). Dies führte gerade in peripheren Regionen zu einem Unterschätzen der Erreichbarkeit

(Richardson & Young 1982, S. 80; Widener *et al.* 2015, S. 77ff.). Zweitens wird bemängelt, dass raumzeitliche Restriktionen keine Rolle spielen (Kwan 1998, S. 196). Diese Restriktionen führen jedoch dazu, dass Personen einzelne Gelegenheiten nicht oder nur mit einem sehr großen Aufwand innerhalb ihrer täglichen Routinen erreichen können. Der Vorteil personenbasierter Erreichbarkeitsindikatoren ist die Befriedigung theoretischer Anforderung hinsichtlich zeitlicher und individueller Restriktionen (Geurs & van Wee 2004, S. 134).

Die Personenbasierte Erreichbarkeit bemisst sich über die Menge und Dauer aller Aktivitäten, die an einem Tag unter Berücksichtigung individueller Zeitbudgets und einer spezifischen Verkehrsmittelnutzung durchführbar sind (Geurs & van Wee 2004, S. 129; Lei & Church 2010, S. 287). Die zugrundeliegenden Messkonzepte gehen zurück auf die Zeitgeographie von Hägerstrand (1970; 1989), welche Bewegungen im Raum als eine Funktion aus Zeit und Standorten beschreibt. Demnach spannt sich um jedes Individuum ein potenziell erreichbarer Aktivitätsraum. In einer Untersuchung am Beispiel von Columbus (USA) wurden insgesamt 30 Indikatoren der standörtlichen oder personenbasierten Erreichbarkeit verglichen (Kwan 1998). Die standortbasierte Erreichbarkeit wurde über Kumulations- und Potenzialindikatoren abgebildet, die personenbasierte Erreichbarkeit über potenzielle Aktionsräume. Die Ergebnisse zeigen eine starke Korrelation zwischen den Indikatorwerten der beiden Messkonzepte. Zwischen der standörtlichen und der individuellen Perspektive bestehen jedoch erhebliche Unterschiede (ebd., S. 201ff.). Die Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass die Erreichbarkeit von den Standorten feststehender Aktivitäten (Ankeraktivitäten) und der Größe des Zeitfensters zwischen einzelnen Aktivitäten abhängt (Kwan 2008, S. 113).

Die Berechnung von Wegeketten im Kontext von personenbasierten Erreichbarkeitsindikatoren ist auch aufgrund der großen Überschneidung mit aktivitäts- und agentenbasierten Verkehrsnachfragemodellen relevant (Pinjari & Bhat 2011). Es stellt sich die Frage, ob auf Wegeketten basierende Erreichbarkeitsindikatoren auch in der Verkehrsmodellierung zum Einsatz kommen können. Da in diesen Modellen jedoch eine wesentlich geringere und auf Verkehrszellen basierende räumliche Auflösung üblich ist, ist die Übertragbarkeit bisher noch erschwert.

Joint accessibility

Eine Variante personenbasierter Erreichbarkeitsindikatoren ist die *joint accessibility* bzw. die verbundene Erreichbarkeit (Neutens *et al.* 2008). Sie bildet die Leichtigkeit ab, mit der sich mindestens zwei Personen an einem Ort treffen können, um dort einer gemeinsamen Aktivität nachzugehen. Obwohl individuelle Tagesabläufe diese Möglichkeit entscheidend beeinflussen, werden bisher lediglich exemplarische Tagesabläufe, Wegeketten und eine geringe räumliche Auflösung berücksichtigt (ebd., S. 335).

Eine vereinfachte Form der *joint accessibility* ist das social interaction potential (SIP) nach Farber *et al.* (2013). Das SIP gibt an, wie lange sich eine Person an einem Ort aufhalten kann, wenn Zeitbudget, Start- und Zielort vorgegeben sind. Wenn einer Person für den Weg vom Arbeitsplatz zur Wohnung insgesamt 90 Minuten zur Verfügung stehen kann berechnet werden, an welchen Standorten welche Verweildauer möglich ist, bis die Summe aus Reisezeit und Verweildauer das Zeitbudget erreicht. Das SIP basiert auf dem tatsächlichen Pendlerverhalten, spiegelt also den realen Mobilitätsbedarf wieder. In einem Rechenbeispiel wurden die realen Pendlerverflechtungen der Region Salt Lake City (USA) auf 373 Verkehrszellen übertragen. Wenn jede Person auf ihrem Heimweg vom Arbeitsort zum Wohnort noch jeweils eine andere Verkehrszelle besucht, bleiben ihr durchschnittlich 11,6 Minuten für soziale Interaktionen oder Einkäufe, ohne ein Zeitbudget von 90 Minuten zu überschreiten (Farber *et al.* 2013, S. 494). Die Lagegunst eines Wohnstandortes gegenüber einem Arbeitsstandort ergibt sich somit aus der mittleren Verweildauer an weiteren Orten.

In regionalen Erreichbarkeitsmodellen spielen verbundene Erreichbarkeiten bisher keine Rolle. Eine Ursache ist die geringe Verallgemeinerbarkeit. Die zu treffenden Annahmen sind sehr speziell und müssen für unterschiedliche Fragestellungen angepasst werden. Hinzu kommt, dass die *joint accessibility* nach Neutens *et al.* bisher nur für wenige Gruppen und mit einer geringen räumlichen Auflösung berechnet werden kann. Das SIP nach Farber *et al.* weist zwar eine höhere Verallgemeinerbarkeit auf, erfordert aber die Berechnung und Verarbeitung von Quell-Ziel-Matrizen. Dies ist für hochaufgelöste regionale Räume nicht oder nur mit einem großen Aufwand möglich.

Space-time prisms und Wegekettten

Werden nicht nur Wege zwischen zwei Standorten als Möglichkeitsraum von Interaktionen verstanden, sondern die Gesamtheit aller täglichen Wege, kommt die Zeitgeographie (engl. time geography) zum Einsatz. Sie basiert auf der Annahme, dass räumliche und zeitliche Faktoren den täglichen Interaktionsradius bestimmen (Hägerstrand 1970; Miller 2007).

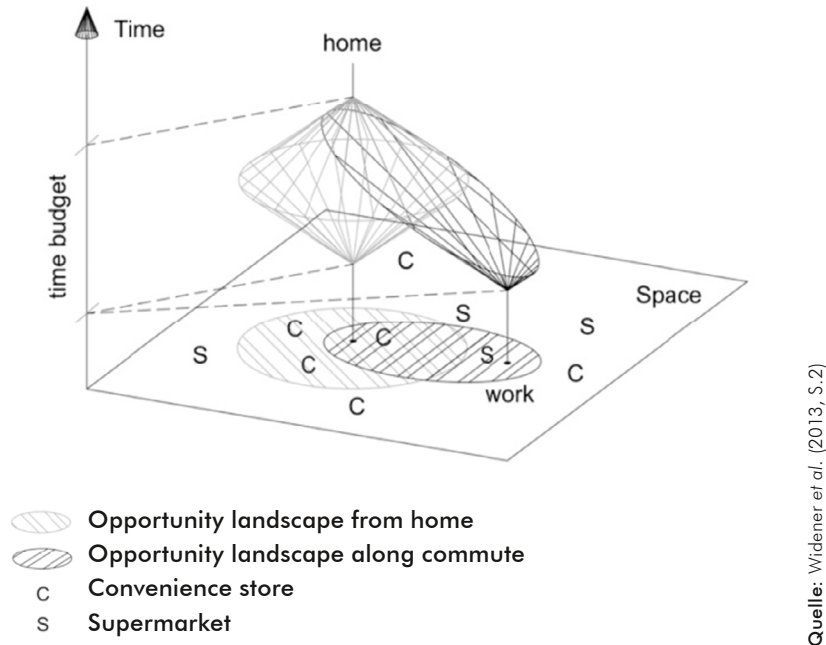
Space-time prisms (STP) sind das wesentliche Werkzeug der Zeitgeographie und repräsentieren den Raum, den eine Person unter Berücksichtigung von Ankerpunkten (u. a. Wohnort und Arbeitsort), der Aktivitätsdauer, dem Zeitbudget, der Verkehrsmittelnutzung und der Reisezeit erreichen kann (Hägerstrand 1970; Lenntorp 1976). In Abbildung 11 sind zwei STP ausgehend vom Wohnstandort dargestellt, einmal ohne Ankerpunkt und einmal unter Berücksichtigung des Arbeitsplatzes. Auf der x- und y-Achse ist das innerhalb eines Tages maximal erreichbare Gebiet abgetragen. Die z-Achse symbolisiert die Zeit und das verfügbare Zeitbudget. Wenn sich das Zeitbudget vergrößert, öffnet sich automatisch der Interaktionsraum. Die Steigungen auf der z-Achse ergeben sich aus den Reisezeiten im Verkehrssystem. Je geringer der Raumwiderstand, desto geringer die Steigung und desto größer der Interaktionsraum.

Ein mögliches Anwendungsbeispiel der Zeitgeographie in Erreichbarkeitsanalysen ist die Kombination unterschiedlicher Aktivitäten auf Rückwegen von Arbeitsplätzen in ländlichen Räumen. Eine erste Umsetzung in einem regionalen Modell erfolgte durch Salze *et al.* (2011) am Beispiel der 526 Gemeinden des Départements Bas-Rhin (FR). Bei diesem Ansatz werden jedoch nur die Erreichbarkeitspotenziale am Wohnort i und am Arbeitsort k über die Distanz zwischen i und k gewichtet. Wegekettten werden nicht abgebildet (ebd., S. 4ff.). Ein weiterer Ansatz ist das von Widener *et al.* (2013) entwickelte SMIP (*supermarket interaction potential*). Das SMIP gibt die Aufenthaltsdauer in einem Supermarkt auf Heimwegen vom Arbeitsplatz an, ohne ein Zeitbudget von 120 Minuten zu überschreiten (ebd., S. 3). Anschließend erfolgt ein Vergleich mit der möglichen Verweildauer, wenn der nächste Supermarkt separat vom Wohnstandort angefahren wird. Die Berechnungen wurden mit einem Modell aus 359 Verkehrszellen durchgeführt. Die Arbeit konnte zeigen, dass sich die Flächen mit einer schlechten Lebensmittelversorgung reduzieren, wenn nicht nur Wege vom Wohnstandort, sondern auch

Heimwege vom Arbeitsort berücksichtigt werden (ebd., S. 4ff.). Weitere Anwendungsfälle der Integration von öffentlichen Verkehrsmitteln in STP stammen von Widener *et al.* (2015) sowie von Liao & van Wee (2017).

Die Nutzbarkeit von STP in regionalen Erreichbarkeitsmodellen und in der praktischen Anwendung ist bisher nicht gegeben. Die große Zahl zu berechnender Verbindungen (n-zu-n-zu-n...-n) erzeugt einen hohen Rechenaufwand, welcher seinerseits durch eine hohe räumliche Aggregation kompensiert wird. Die starke Aggregation steht der avisierten Kleinräumigkeit jedoch entgegen. Außerdem sind auf STP basierende Indikatoren nur unter Verwendung umfangreicher Daten zu ermitteln. Zu diesen gehören disaggregierte Verkehrsverflechtungen und standortscharfe Bevölkerungsdaten. Zu hinterfragen ist außerdem, ob aus STP überhaupt Maßnahmen und Handlungsempfehlungen ableitbar sind, die sich nicht auch aus anderen Indikatoren ergeben würden.

Abbildung 11: STP für den Wohnstandort und entlang eines Pendelweges



2.1.4 Zwischenfazit: Erreichbarkeitsindikatoren in regionalen Modellen

In der praktischen Anwendung und im wissenschaftlichen Kontext wird bereits eine unübersichtliche Menge unterschiedlicher Erreichbarkeitsindikatoren eingesetzt. Die vergleichende Darstellung zeigt nur zum Teil sich überschneidende Zielsetzungen. Erreichbarkeitsindikatoren, die räumliche, infrastrukturelle, zeitliche und individuelle Komponenten vollständig integrieren, existieren bisher nicht. Gerade aus der regionalen Anwendung und der praktischen Integration resultieren erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der Berechenbarkeit und Nutzbarkeit verschiedener Indikatoren. So wurden im wissenschaftlichen Bereich viele Erreichbarkeitsindikatoren für mehr oder weniger singuläre Fragestellungen entwickelt, die so nicht in die Praxis zu überführen sind. Auf der anderen Seite wird in regionalen Modellen mit dem Anspruch einer praktischen Nutzbarkeit nach wie vor auf einfache und wenige komplexe Erreichbarkeitsindikatoren zurückgegriffen (vgl. Kapitel 4). Die entscheidenden Auswahlkriterien sind die Rechenzeit, die Datenverfügbarkeit und insbesondere die Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Da die Nutzbarkeit und Interpretierbarkeit unterschiedlicher Erreichbarkeitsindikatoren in der Planungspraxis bereits hinreichend erforscht wurden ist davon auszugehen, dass auf diesem Gebiet vorläufig keine weiteren Erkenntnisgewinne zu erwarten sind.

In der Erreichbarkeitsmodellierung sind also vor allem Reiseaufwands- und Kumulationsindikatoren von herausragender Bedeutung. Insofern muss untersucht werden, welche besonderen Herausforderungen Reiseaufwands-, Kumulations- und Potenzialindikatoren an regionale Erreichbarkeitsmodelle hinsichtlich des praktischen Einsatzes stellen (vgl. Kapitel 3 und 4).

2.2 Raumbezugssysteme

Die Auflösung des Raumbezugssystems hat einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit und die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen. Wie bei den verwendeten Erreichbarkeitsindikatoren gilt auch hier, dass das Spannungsverhältnis zwischen der Genauigkeit und der Nutzbarkeit gerade in regionalen und multimodalen Erreichbarkeitsmodellen

besonders ausgeprägt ist (vgl. Abschnitt 1.6). Dabei zeichnen sich Erreichbarkeitsmodelle durch eine im Vergleich zu Verkehrsmodellen wesentlich höhere räumliche Auflösung aus (Molloy & Moeckel 2017, S. 2). Die Auswahl des Raumbezugssystems hängt von drei entscheidenden Faktoren ab: Dem Untersuchungsgegenstand (1), der avisierten Rechenzeit (2) und den verfügbaren Datengrundlagen (3). Um möglichst geringe Rechenzeiten zu realisieren, die Aufbereitung der Ergebnisse zu vereinfachen und die Interpretierbarkeit der Analysen zu verbessern, sollte eine möglichst geringe räumliche Auflösung verwendet werden. Gleichzeitig sind Aggregationsfehler zu vermeiden, die bei einer geringen Auflösung entstehen können (vgl. Abschnitt 2.2.3). In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der räumlichen Auflösung auf die Nutzbarkeit, die Modellgüte, die Rechenzeit und die Datenbereitstellung diskutiert.

2.2.1 Die Bedeutung der räumlichen Auflösung

Die räumliche Auflösung als das Maß der räumlichen Disaggregation ist der vielleicht wichtigste Parameter von Erreichbarkeitsmodellen und entscheidet über die Sichtbarkeit räumlicher Prozesse (Handy & Niemeier 1997, S. 1178; Madelin *et al.* 2009, S. 649ff.). So ist die Verortung und Eingrenzung sozial exkludierter Personengruppen im regionalen oder nationalen Kontext nur dann möglich, wenn das Raumbezugssystem eine hinreichende Auflösung erlaubt. Ob der ÖPNV zu einer Minderung der sozialen Exklusion beiträgt ist nur zu beantworten, wenn das verwendete räumliche Modell in der Lage ist, Angebotsverbesserungen für die jeweiligen Personengruppen auch wirklich abzubilden (Preston & Rajé 2007). Diese Einschränkung resultiert aus dem Wirken des Skaleneffekts (~Maßstabseffekt). Dieser beschreibt die Glättung numerischer Werte (Alter, Einkommen etc.) bei der Aggregation eines Raumbezugssystems. Erreichbarkeitsunterschiede zwischen Gemeinden können nicht identifiziert werden, wenn die Erreichbarkeit nur auf Kreisebene berechnet wird.

Gemeinsam mit dem Zoneneffekt wird der Skaleneffekt als der klassische Aggregationsfehler unter dem Schlagwort der modifiable areal unit problems (MAUP) diskutiert (Openshaw 1984). Eine hohe räumliche Auflösung dient in der Regel der Minderung dieser Aggregationsfehler.

Da die Ergebnisse von Erreichbarkeitsanalysen auch von der räumlichen Aggregation abhängen, ist die Auseinandersetzung mit dem MAUP unumgänglich (Jacobs-Crisioni *et al.* 2014, S. 46). Bereits vor über zehn Jahren beschäftigte sich das European Spatial Planning Observation Network (ESPON) ausgiebig mit dem MAUP in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen (ESPON 2006). Sie haben verschiedene Quellen von Aggregationsfehlern identifiziert und Ansätze zur Fehlerminimierung vorgeschlagen (vgl. Abschnitt 2.2.3.4). Die Integration von Erreichbarkeitsinstrumenten in die Planungspraxis sieht sich indes dem rigorrelevance dilemma ausgesetzt (vgl. Kapitel 1). Zwar wurde vielfach gezeigt, dass hochaufgelöste Erreichbarkeitsmodelle prinzipiell aufgebaut werden können, ihre Verwendung in der Planungspraxis steht jedoch noch aus. In Abschnitt 2.2.2 werden die Gründe für die geringe Nutzbarkeit hochaufgelöster Modelle diskutiert.

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Leistungsfähigkeit von Computern, neuer Routingalgorithmen und Softwarelösungen sowie der stetig wachsenden Datenverfügbarkeit verwundert nicht, dass ein Trend zu immer höher aufgelösten Erreichbarkeitsmodellen erkennbar ist. Die höhere Auflösung betrifft nicht nur das Raumbezugssystem, sondern auch das Zusammenspiel mit Erreichbarkeitsindikatoren, Gelegenheiten und der Detaillierung multimodaler Verkehrsgraphen. Frühe regionale Modelle verwenden in der Regel vektorbasierte Raumbezugssysteme¹⁴ wie Gemeinden oder Kreise. Zu diesen gehört das erste regionale Erreichbarkeitsmodell Österreichs, welches auf Gemeinden beruht, einen vereinfachten Fahrplan enthält und ausschließlich zur Berechnung von Reiseaufwandsindikatoren zum Einsatz kommt (Deußner 1996). Geringe räumliche Auflösungen verwenden auch O'Sullivan *et al.* (2000), das BBR (2005) im Raumordnungsbericht von 2005 und Wulfhorst *et al.* (2010) im Erreichbarkeitsatlas der Metropolregion München.

Doch schon in den frühen 2000er Jahren wurden erste rasterbasierte Erreichbarkeitsmodelle auf regionaler Ebene entwickelt. Zu diesen gehören die Erreichbarkeitsanalysen der Österreichischen Raumordnungskonferenz (ÖROK) für Österreich von 2005. Diese basieren auf einem bewohnten 250-Meter-Raster und wurden nur mit einfachen

14 Siehe Abschnitt 2.2.3.1 zum Unterschied zwischen vektorbasierten und rasterbasierten Raumbezugssystemen.

Reiseaufwandsindikatoren durchgeführt (ÖROK 2007). Auf einer ähnlichen Detaillierung basieren auch die Erreichbarkeitsanalysen der Stadt Wien von 2008. Diese umfassen Baublöcke und beinhalten außerdem die Gehzeiten zu nächsten Haltestellen und fahrplanbasierte ÖPNV-Reisezeiten zu zentralen Standorten (Prinz & Herbst 2008). Erreichbarkeitsmodelle mit einer hohen räumlichen Auflösung, detaillierten Fahrplaninformationen und komplexen Erreichbarkeitsindikatoren wurden jedoch erst in den 2010er Jahren aufgebaut. Beispielsweise ist Tel Aviv in einem rasterbasierten Erreichbarkeitsmodell mit einer flächendeckenden Auflösung von 100 Metern abgebildet (Benenson *et al.* 2017b). Das Modell dient unter anderem der Berechnung von Kumulationsindikatoren. Weitere Modelle existieren in den Regionen Auckland mit knapp 400 Tsd. Baublöcken und rund 12 Tsd. Gelegenheiten (Mavoja *et al.* 2012) sowie in unterschiedlichen Regionen in Deutschland unter Verwendung eines bewohnten 100-Meter-Rasters (Spiekermann & Schwarze 2014). Auch in Nordamerika wurden für den praktischen Einsatz (Owen & Levinson 2012; Owen *et al.* 2017) und verschiedene wissenschaftliche Fragestellungen (Boisjoly & El-Geneidy 2016; Bok & Kwon 2016; Farber & Fu 2017; Tribby & Zandbergen 2012) hochaufgelöste Erreichbarkeitsmodelle aufgebaut.

2.2.2 Die kleinräumige Modellierung in der Planungspraxis

Erreichbarkeitsmodelle sollen auch der Anwendung im behördlichen Planungsalltag dienen. Die Integration in die Planungspraxis ist bisher jedoch weitgehend misslungen (vgl. Kapitel 1). Als Gründe werden eine zu hohe Komplexität und Technikorientierung, sowie die geringe Flexibilität im Umgang mit unvorhersehbaren Planungsaufgaben genannt (te Brömmelstroet 2007, S. 9). Das rigorrelevante Dilemma meint in diesem Zusammenhang das Aufeinandertreffen von an der Genauigkeit orientierten Entwicklern und an der Nutzbarkeit und Interpretierbarkeit interessierten Nutzern (te Brömmelstroet *et al.* 2014, S.vii). Es stellt sich also die Frage, wie Erreichbarkeitsmodelle aufgebaut sein müssen, um zur praktischen Anwendung zu gelangen. Im Kontext der räumlichen Auflösung ist zu beantworten, welcher Grad der Disaggregation überhaupt

einen Zusatznutzen liefert und wie hoch der resultierende Zusatzaufwand ist. Zu beantworten ist außerdem, ob bereits Präferenzen hinsichtlich einer bestimmten Auflösung existieren. Hewko *et al.* (2002, S. 1203) fassen das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag wie folgt zusammen:

»There is, however, a substantial trade-off between the efficiency of the analysis (in terms of computing time, data preparation etc.) and the improvement of the approximation of [accessibility].«

Bisher gibt es keine Untersuchungen, die für spezifische Fragestellungen darlegen können, welche räumliche Auflösung vorzuziehen ist. Lediglich erste Hinweise können aus einzelnen Arbeiten abgeleitet werden. So wurde gezeigt, dass Praxisanwender raster- und vektorbasierte Raumbezugssysteme ähnlich einfach lesen und interpretieren können (te Brömmelstroet *et al.* 2016, S. 1188). Diese Untersuchung kommt aber auch zum dem Schluss, dass der rasterbasierte Ansatz den Gebrauch einer gemeinsamen Sprache erschwert, da diesem keine tradierte Raumeinteilung zugrunde liegt. Dem Rasteransatz werden jedoch, und das muss durchaus als Widerspruch gelten, eine hohe Effizienzsteigerung bei der Durchführung von Analysen und eine verbesserte Kommunikation zugestanden (2016, S. 1188, 1189). Auch Kwan & Weber (2008, S. 112) bemängeln, dass sich die Raumauflösung eher an der Datenverfügbarkeit und Modellierbarkeit, nicht jedoch an der individuellen Wahrnehmung des Raumes orientiert. In diesem Zusammenhang empfehlen sie jedoch eine weitere Disaggregation, um individuelle Interaktionsmuster besser abzubilden und den theoretischen Annahmen eher zu entsprechen. Zudem sollten neue GIS-Technologien zur Reduzierung des MAUP in Erreichbarkeitsmodellen genutzt werden (Kwan & Weber 2003, S. 344, 345).

Es kann bisher nicht abschließend geklärt werden, ob die Planungspraxis eine bestimmte räumliche Auflösung, ungeachtet ihrer inhaltlichen Vor- und Nachteile, eindeutig präferiert. Insofern muss der Fokus auf den Faktoren liegen, die die praktische Nutzbarkeit nur indirekt beeinflussen. Zu diesen gehören die Rechenzeit, der Speicherbedarf und die Genauigkeit.

Neben den genutzten Erreichbarkeitsindikatoren (vgl. Abschnitt 2.1) und der Detaillierung des Verkehrsgraphen (vgl. Abschnitt 2.3) ist die räumliche Auflösung der entscheidende Parameter, welcher die

Rechenzeiten beeinflusst. In regionalen Modellen kann die Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren für mehrere hunderttausend Raumeinheiten und Gelegenheiten in einem multimodalen Verkehrsgraphen mehrere Stunden oder Tage dauern (Benenson *et al.* 2017b, S. 236; Kujala *et al.* 2018, S. 53). Immer wieder wird die Bedeutung eigener Szenarien (*»easy to play with«*) in Webanwendungen hervorgehoben (te Brömmelstroet 2010, S. 34; Papa *et al.* 2017, S. 115ff.; Pusch 2019, S. 210). Wie im Projekt *UrbanRural SOLUTIONS* gezeigt, wird dies jedoch durch eine hohe räumliche Auflösung ebenfalls negativ beeinflusst (Peter 2019).

In regionalen Erreichbarkeitsmodellen kommt der Genauigkeit eine besondere Bedeutung zu, da den Modellentwicklern in der Regel das nötige lokale Wissen fehlt, um Mängel in der Datenbasis zu erkennen (vgl. Abschnitt 2.2.5). Hinzu kommt der bei der Validierung und Neuberechnung regionaler Erreichbarkeitsmodelle entstehende hohe zeitliche Aufwand. Insofern bedeutet eine geringere Auflösung nicht nur eine reduzierte Fehleranfälligkeit, sondern auch eine beschleunigte Neuberechnung nach der Fehlerkorrektur. Lange Berechnungszeiten wirken sich insofern nachteilig aus, da die Berechnungen erfahrungsgemäß nicht in den ersten zwei bis drei Durchläufen fehlerfrei umzusetzen sind. Außerdem führen die komplexen, nicht auf einem spezialisierten Softwareansatz aufbauenden Erreichbarkeitsmodelle zu häufigen Fehlern in der Toolentwicklung.

Detaillierte regionale Erreichbarkeitsmodelle produzieren zudem große Datenmengen. Je höher die räumliche Auflösung, desto größer ist auch die Anzahl räumlicher Einheiten und entsprechend die Menge an Einzelwerten. Die reine Datenhaltung kann aufgrund des Preisrückgangs bei Speichermodulen noch vernachlässigt werden. Anders verhält es sich mit der Ergebnisdarstellung. Gerade wenn diese auf einer Weboberfläche basiert, führen große Datenmengen zu Einschränkungen im Seitenaufbau. Dies betrifft auch das Erreichbarkeitssportal der Metropolregion Hamburg (vgl. Anmerkungen), dessen Struktur auch die Übertragung der Rasterzellen notwendig macht (MRH o.J.a; Peter 2018). Große Datenmengen fallen ebenfalls an, wenn Erreichbarkeitsindikatoren auf Basis von vorberechneten Raumwiderständen ermittelt werden. Der Daseinsvorsorgeatlas Niedersachsen (DVAN) ermöglicht dem Online-Anwender die Berechnung von

Standortsszenarien der Daseinsvorsorgeeinrichtungen (Matthes *et al.* 2019, S. 166). Um die Performance zu verbessern, wurden auf einem kleinräumigen Raster die für die Bewertung von Szenarien notwendigen Raumwiderstände vorberechnet (Peter 2019). Zudem sind nicht nur fiktive Änderungen, sondern auch Korrekturen an der Raumstruktur als Szenarien zu interpretieren. Insofern ermöglicht dieser Ansatz die ständige Aktualisierung der Erreichbarkeitsanalysen auf Basis der aktuellen Standortdaten.

Fraglich ist allerdings, welche Vorteile sich aus einer höheren räumlichen Auflösung ergeben und bis zu welchem Grad der Disaggregation diese wirksam sind. Immer wieder wurden Untersuchungen durchgeführt, die eine geringe Erklärbarkeit räumlicher Prozesse auf Basis aggregierter Erreichbarkeitsmodelle zeigen. Dies betrifft beispielsweise die soziale Exklusion im Allgemeinen (Preston & Rajé 2007), als auch die Benachteiligung von Frauen im Speziellen (Kwan 1999). Diese Untersuchungen beziehen sich jedoch immer auf größere administrative Gebietseinheiten und nicht auf kleinräumige Raster. Auch fehlen in diesen Arbeiten Effektvergleiche zwischen einzelnen Erreichbarkeitsindikatoren und Verkehrsmodi.

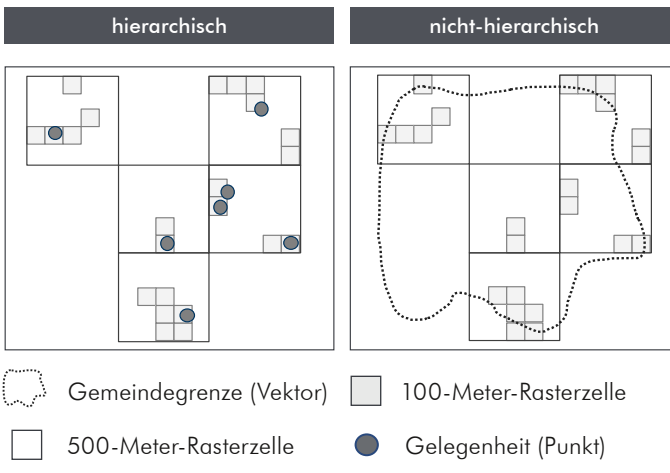
2.2.3 Genauigkeit und Aggregationsfehler

In den letzten Abschnitten wurde der Umgang mit der räumlichen Auflösung in der Planungspraxis geklärt. Dabei wird deutlich, dass bisher keine eindeutige Präferenz hinsichtlich einer bestimmten Raumeinteilung identifiziert werden konnte. Regionale Erreichbarkeitsmodelle sollten jedoch so aufgebaut sein, dass geringe Rechenzeiten entstehen und wenig Speicherplatz benötigt wird. Der Anspruch nach einer hohen Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen bleibt davon unberührt. In diesem Kapitel werden Aggregationsfehler vorgestellt, die in jedem Erreichbarkeitsmodell ihre Wirkung entfalten. Anschließend werden möglich Ansätze für ihre Reduzierung vorgeschlagen.

2.2.3.1 Die räumliche Aggregation in Erreichbarkeitsmodellen

In Erreichbarkeitsmodellen kann eine Aggregation von räumlichen, zeitlichen und graphischen (vgl. Abschnitt 2.3) Elementen vorgenommen werden (Bhat *et al.* 2002, S. 19). Das Ziel der räumlichen Aggregation ist es, die Anzahl der Raumeinheiten zu verringern und damit die Nutzbarkeit des Erreichbarkeitsmodells zu verbessern (vgl. Abschnitt 2.2.4). In diesem Zusammenhang steht die Aggregation für die Repräsentativität räumlich verteilter Phänomene durch einen Einzelpunkt (Hewko *et al.* 2002, S. 1185). Beispielsweise können die Bewohner einer Gemeinde über das Gemeindegebiet repräsentiert werden. Der Bezugspunkt der Gemeinde, zumeist der Mittelpunkt, ist dann auch der Bezugspunkt für alle räumlichen Interaktionen der Bewohner. Ein weiteres Beispiel ist die Aggregation von Haltemasten und Haltestellenbereichen zu Haltestellen (vgl. Abschnitt 3.5.1). Wenn der Hauptbahnhof ausschließlich über einen Haltestellenpunkt repräsentiert wird, ist keine Berücksichtigung von Gehzeiten zu den einzelnen Abfahrtsbereichen möglich. Eine räumliche Aggregation kann jedoch nicht nur der Verallgemeinerung individueller Bezugspunkte dienen, sondern auch der numerischen und

Abbildung 12: Hierarchisierung von Raumeinteilungen



Quelle: eigene Darstellung

kartographischen Darstellung soziodemographischer Größen. Beispielsweise ist es üblich, dass Alter von Einwohnern auf Ebene von Gemeinden und Kreisen, aber nicht über Haushalte oder Individuen abzubilden.

Die räumliche Aggregation folgt in der Regel einem hierarchischen Aufbau. Das heißt, dass die Überführung eines niedrigen Aggregationsniveaus in alle höheren Aggregationsniveaus möglich ist. Dies ist aber nur möglich, wenn sich die Grenzen der einzelnen Aggregationsniveaus nicht überschneiden (vgl. Abbildung 12). Die Aggregation von Punktdaten (Adressen, Standorte, Geokoordinaten etc.) ist prinzipiell in jedes höhere Aggregationsniveau möglich, da Punkte einen eindeutigen räumlichen Bezug besitzen. Räumliche Gebiete lassen sich in Polygone (vektorbasiert) und Rasterzellen unterteilen (Neumeier 2014, S. 10) (vgl. Abbildung 12). Ein Polygon ist ein geschlossener Linienzug, welcher seinerseits durch eine gerichtete Abfolge von Punkten (xy-Koordinaten) in einem Vektor gekennzeichnet ist (Timpf o.J., S. 85). Eine Sonderform von Polygonen ist das Rastermodell. Dieses besteht zumeist aus quadratischen Rasterzellen mit identischen Kantenlängen und Flächeninhalten. Es besteht also, im Unterschied zu Polygonen, aus einer homogenen Geometrie (o.J., S. 93). Die Vorteile von Polygonen sind die einfache Implementierung, die zumeist geringen Rechenzeiten und die geringen Datenanforderungen. Zu den Nachteilen gehören die geringe Flexibilität, die fehlende interne Differenzierung und die ungenaue Abgrenzung von Isochronen (Streit 2011 In: Neumeier 2014, S. 12). Rastermodelle werden in der Regel eingesetzt, um eine höhere räumliche Auflösung zu erzielen. Ihre wesentlichen Vorteile sind die hohe Flexibilität, die geringe interne Variation sowie die Möglichkeit zur weiteren Aggregation. Diesen Vorteilen stehen jedoch lange Berechnungszeiten, große Datenmengen und fehlerhafte Topologien gegenüber (Timpf o.J., S. 104, 105).

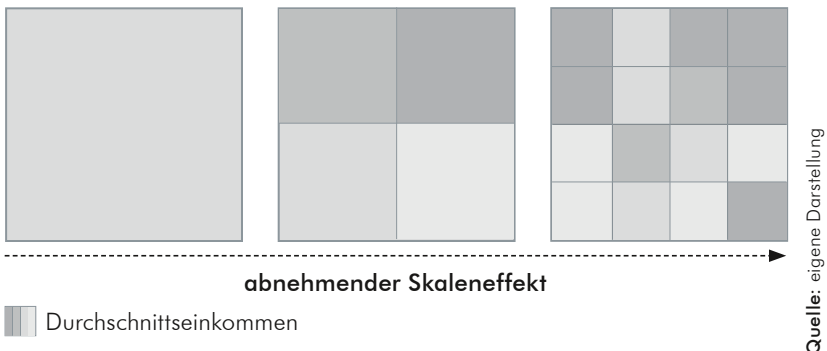
2.2.3.2 Klassifizierung von Aggregationsfehlern

Die systematische Quantifizierung und Beschreibung von Aggregationsfehlern begann in den 1970er Jahren (Batty *et al.* 1973). Später fanden sie unter dem Schlagwort der MAUP eine große Verbreitung (Openshaw 1984). Alle Aggregationsfehler in der Erreichbarkeitsmodellierung lassen sich auf das MAUP zurückführen (vgl. Abschnitt 2.2.3.3).

Der Skaleneffekt

Der Skalen- oder Maßstabeffekt beschreibt die Abhängigkeit numerischer Werte von der Anzahl räumlicher Repräsentationen (Dark & Bram 2007, S. 472). Die Unterteilung eines Gebietes in mehrere Untergebiete führt zu einer Erhöhung numerischer Werte und folglich zu einer verbesserten Abbildung der räumlichen Gegebenheiten. Abbildung 13 zeigt das Durchschnittseinkommen je Flächeneinheit in Abhängigkeit von der Auflösung eines Rastermodells. Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Durchschnittseinkommen werden erst mit einer Erhöhung der Auflösung sichtbar. Die Zunahme an Einzelwerten bedeutet gleichzeitig eine Reduzierung des Skaleneffektes. Skaleneffekte können unter anderem dazu führen, dass Zusammenhänge zwischen dem Durchschnittseinkommen und der Raumstruktur berechnet werden, obwohl kein Zusammenhang besteht (Madelin *et al.* 2009, S. 646). Möglich ist aber auch, dass Zusammenhänge zwischen einzelnen Variablen nicht erkannt werden, da sie nur auf Ebene von Stadtteilen oder Quartieren, nicht aber auf Ebene von Kreisen oder Gemeinden sichtbar sind. In Erreichbarkeitsmodellen ist das Zentroidproblem und das Eigenpotenzialproblem direkt mit dem Skaleneffekt verknüpft (Dalvi & Martin 1976, S. 32ff.; Hewko *et al.* 2002, S. 1188ff.). Dabei geht es im Wesentlichen um die Bindung der modellierten räumlichen Interaktionen an die Bezugspunkte der verwendeten Raumeinheiten. Eine Reduzierung der Auflösung führt zu einer Zunahme der verdeckten Interaktionen (vgl. Abschnitt 2.2.3.3).

Abbildung 13: Wirkungsweise des Skaleneffektes



Der Zoneneffekt

Der Zoneneffekt ist hingegen ein Maß für die Variation zwischen numerischen Werten in Abhängigkeit von der Einteilung der räumlichen Repräsentationen (Fotheringham 1989; Dark & Bram 2007; Kwan & Weber 2008). Seine Wirkung wird beeinflusst von der Stärke und der Art der räumlichen Aggregation (Madelin *et al.* 2009, S. 646). Ein bekanntes Beispiel für den Zoneneffekt ist das sogenannte gerrymandering (Openhaw & Rao 1995, S. 427). Dieses als Wahlkreisschiebung bezeichnete Verfahren, wird insbesondere im Mehrheitswahlsystem der Vereinigten Staaten eingesetzt. Dabei werden durch die Mehrheitsführer die Grenzen von Wahlkreisen mit dem Ziel verschoben, bei der nächsten Wahl möglichst viele Wahlkreise knapp zu gewinnen und wenige deutlich zu verlieren. Bei einer konsequenten Anwendung übersteigt der Anteil gewonnener Wahlkreise jenen der gewonnenen Stimmen deutlich.

Abbildung 14 zeigt die Beeinflussung der räumlichen Ausprägung eines numerischen Phänomens durch die konkrete Zoneneinteilung. Unter A ist die nicht aggregierte Ausgangssituation dargestellt. Anschließend erfolgt die Aggregation in die Raumbezugssysteme B und C. Zwar liegt der Mittelwert über alle Ausprägungen auch weiterhin bei 5,5, dennoch unterscheiden sich die Mittelwerte der aggregierten Zonen deutlich. Auch die Standardabweichungen weisen große Unterschiede auf. Dieses Beispiel zeigt die Beeinflussung des in A dargestellten Phänomens durch die räumliche Aggregation.

Abbildung 14: Wirkungsweise des Zoneneffektes

A				B		C	
3	8	7	4	5.5	5.5	8.375	
11	9	1	24			2.625	
1	5	3	1				
3	4	2	2				
$\bar{x} = 5,5$ $s = 5,43$ \bar{x} = Mittelwert				$\bar{x} = 5,5$ $s = 0,0$ S = Standardabweichung		$\bar{x} = 5,5$ $s = 2,875$	

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Jelinski & Wu (1996, S. 131)

2.2.3.3 Bedeutung von Aggregationsfehlern in Erreichbarkeitsmodellen

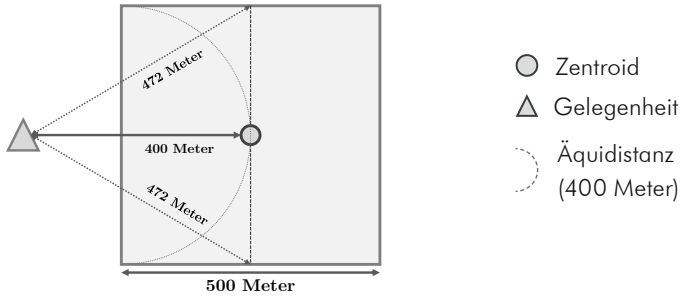
Die ersten systematischen Untersuchungen im Kontext von Erreichbarkeitsuntersuchungen erfolgten seit dem Ende der 1960er Jahre (Dalvi & Martin 1976, S. 31ff.; Judge 1974; Thomas 1969). Im Fokus standen der Einfluss der räumlichen Aggregation auf die tatsächlich im Modell messbaren Interaktionen und die Möglichkeit, Erreichbarkeitsindikatoren über aggregierte Raumeinheiten repräsentativ darzustellen (Dalvi & Martin 1976, S. 32).

Das Zentroidproblem

Im direkten Zusammenhang zum Skaleneffekt steht das Zentroidproblem. Das Zentroidproblem resultiert aus der räumlichen Auflösung von Interaktionsmöglichkeiten in Erreichbarkeitsmodellen (Dalvi & Martin 1976; Hillsman & Rhoda 1978). Durch die Kleinräumigkeit werden der Skaleneffekt reduziert und Erreichbarkeitsunterschiede sichtbar, die bei einer hohen Aggregation eingeebnet wären. Bereits 1973 hoben Batty *et al.* die Bedeutung einer hohen räumlichen Auflösung hervor, um räumliche Interaktionen und Allokationen richtig zu beschreiben. Sie betonten aber auch, dass die Modellentwicklung technischen Grenzen unterliegt (1973, S. 364). Eine erste weitergehende Untersuchung des Zentroidproblems haben Dalvi & Martin (1976) am Beispiel Londons durchgeführt. Sie konnten zeigen, dass eine zusätzliche Aggregation in der Regel zu verringerten Erreichbarkeitswerten führt (ebd., S. 36ff.).

Eine allgemeine Formulierung von Aggregationsfehlern bei der Distanzberechnung bieten Hillsman & Rhoda (1978). Sie unterscheiden zwischen Fehlern der Typen A, B und C. Diese Fehler beschreiben den Einfluss von Zentroiden auf das Verhältnis zwischen tatsächlichen Wegelängen und geschätzten Distanzen unter Berücksichtigung von Zentroiden (ebd., S. 75). Als Fehler A wird ein Unterschätzen der Distanzen zwischen aggregierten Raumeinheiten und standortscharfen Gelegenheiten aufgrund nicht möglicher Repräsentativität des Zentroiden verstanden. Abbildung 15 zeigt die Distanz zwischen einem Zentroiden und einer zufällig gewählten Gelegenheit. Die Distanzen zwischen allen Punkten auf der halbierenden Geraden (mit Ausnahme des Zentroiden) und der Gelegenheit liegen oberhalb der Distanz ausgehend vom

Abbildung 15: Fehler A der räumlichen Aggregation



Quelle: eigene Darstellung

Zentroiden. Entsprechend ist die berechnete Distanz nicht repräsentativ gegenüber den im Mittel tatsächlich aufzubringenden Wegelängen, da ein Verschieben des Zentroiden die Abweichung zumeist vergrößert. Aggregationsfehler vom Typ A sind eine allgemeine Formulierung des Zentroidproblems und prinzipiell nicht vermeidbar.

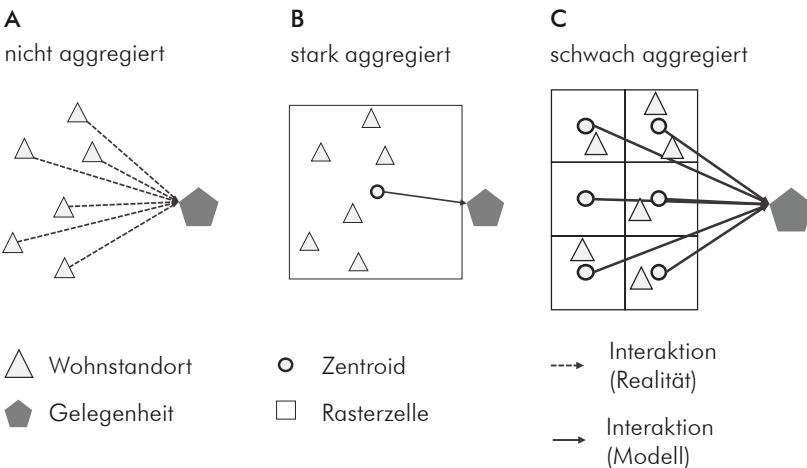
Das Zentroidproblem resultiert also aus der Verwendung von Zentroiden zur Abbildung von Interaktionen zwischen Raumeinheiten (Dalvi & Martin 1976, S. 32ff.). Prinzipiell ist zwischen der Charakteristik des Raumes bzw. der Raumeinteilung und der Charakteristik von Interaktionen bei der Bewertung des Zentroidproblems zu unterscheiden (Stepniak & Jacobs Crisiani 2017, S. 18). Wie in Abbildung 16 dargestellt, führt eine starke Aggregation zu einer hohen Generalisierung individueller Interaktionen, bei einer schwachen Aggregation nähern sich modellierte und reale Interaktionen hingegen an.

Der Skaleneffekt beeinflusst die Auflösung von Interaktionen und Interaktionsmöglichkeiten zwischen räumlich getrennten Raumeinheiten. Dieser Effekt beeinflusst die absoluten Erreichbarkeitswerte aber auch relative Unterschiede zwischen einzelnen Raumeinheiten. Zu einer Verzerrung der relativen Abweichungen kommt es dann, wenn das Raumbezugssystem in einem Erreichbarkeitsmodell eine uneinheitliche Auflösung besitzt (Pooler 1987, S. 274). Die Größe statistischer Gebiete hängt häufig von der Datendichte (Bebauung, Bevölkerung etc.) ab.

Folglich sind diese Gebiete in Innenstädten zumeist wesentlich kleiner als am Stadtrand. Auch Gemeinden und Kreise weisen sehr heterogene Gebietsgrößen auf. Da eine starke räumliche Aggregation tendenziell zu einem Unterschätzen der realen Raumwiderstände führt, werden die relativen Erreichbarkeitswerte in zentralen Lagen im Vergleich zu peripheren Lagen tendenziell unterschätzt (Dalvi & Martin 1976, S. 37).

Nach Hewko *et al.* (2002, S. 1185) entstehen Aggregationsfehler dann, wenn räumlich verteilte Individuen und ihre Interaktionen über Zentroide nachgebildet werden. Am Beispiel von Edmonton (Alberta, CA) untersuchten sie, wie sich die räumliche Auflösung auf die Berechnung von kürzesten Wegen zu nächsten Gelegenheiten auswirkt. Drei Ansätze kamen zur Anwendung. Von 199 Wohnbezirken wurden die geometrischen Zentroide (1) sowie die einwohnergewichteten Zentroide (2) berücksichtigt. Im dritten Ansatz wurden die kürzesten Wege für alle 18.396 Postleitzahlgebiete separat berechnet. Anschließend erfolgte die Berechnung der einwohnergewichteten mittleren Distanzen für die 199 Wohnbezirke (3). Die Gelegenheiten umfassen unter anderem adressgenaue Standorte von 301 Spielplätzen und 19 Freizeitzentren. Die Distanzberechnung

Abbildung 16: Der Skaleneffekt und das Zentroidproblem



Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Current & Schilling (1987, S. 96)

erfolgte ausschließlich auf Basis von Luftlinienentfernungen (ebd., S. 1194). Dieses idealisierte Abbild der realen Gegebenheiten ermöglicht die Quantifizierung von Aggregationsfehlern in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung und ohne die verzerrenden Einflüsse von Verkehrsgraphen. Gleichwohl machen Besonderheiten des Verkehrsnetzes und insbesondere des ÖPNV-Netzes zusätzliche Aggregationsfehler wahrscheinlich. In der Verwendung einer hohen Auflösung und der anschließenden einwohnergewichteten Aggregation der Ergebnisse liegen zwei entscheidende Vorteile. Erstens werden die realen Interaktionen nicht durch vom Zentroiden ausgehende Interaktionen substituiert. Und zweitens wird keine homogen verteilte Bevölkerung je Raumeinheit unterstellt (ebd., S. 1192). Dieses Verfahren erfordert jedoch einen hohen Rechenaufwand und den Umgang mit großen Datenmengen. Insofern vereinfacht es die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse aber nicht die Berechnung der Indikatoren.

Die Analysen zeigen, dass sowohl die mittleren Entfernungen als auch die Standardabweichungen und die Extremwerte der kürzesten Wege je nach Untersuchungsansatz variieren. Bei Verwendung einfacher Zentroide ergibt sich eine mittlere euklidische Distanz zum nächsten Spielplatz von 311 Metern. Bei der Verwendung einwohnergewichteter Zentroide fällt dieser Wert auf 285 Meter. Werden die Entfernungen jedoch mit Hilfe der Postgebiete bestimmt, ergeben sich mittlere Distanzen von 408 Metern. Die Mindestdistanz unter Verwendung der Zentroide liegt bei 5 Metern und bei 175 Metern bei einer Aggregation der Einzelwerte über die Postgebiete (ebd., S. 1195). Die mittlere Distanz zur nächsten Gelegenheit ist abhängig von der Anzahl der Einrichtungen im Gelegenheitstyp. Die kürzeste euklidische Distanz zu einem Spielplatz beträgt 311 Meter ($n = 301$), zum nächsten Freizeitzentrum hingegen zwei Kilometer ($n = 19$). Die Abweichungen zwischen den mittleren Distanzen unter Verwendung von Zentroiden und Postgebieten nehmen bei allen Gelegenheitstypen um rund 100 Meter ab. Entsprechend reduziert sich die relative Bedeutung der Abweichungen mit der Anzahl der Gelegenheiten. Dabei wird jedoch übersehen, dass die Anzahl der Einrichtungen lediglich die relativen Unterschiede beeinflusst. Ursächlich für die Aggregationsfehler ist nicht die Anzahl unterschiedlicher Einrichtungen, sondern ihre Dichte und Verteilung im Untersuchungsgebiet. Die

Analysen in dieser Arbeit setzen die Verzerrungen in den einzelnen Gelegenheitstyp in Relation zu ihrer Dichte in der MRH. Ohne diesen Bezug wäre keine Übertragung der Ergebnisse auf andere Untersuchungsgebiete möglich.

Hewko *et al.* (2002, S. 1203) kommen schließlich zu dem Ergebnis, dass das Zentroidproblem unter Berücksichtigung zahlreicher Gelegenheiten im nachbarschaftlichen Umfeld besonders ausgeprägt ist. Deutlich wird außerdem, dass die Verwendung von einwohnergewichteten Zentroiden auch zu relativen Verzerrungen führt, wenn sehr kurze Wege zu nächsten Gelegenheiten berechnet werden. Dies führt dazu, dass die relative Lagegunst zahlreicher Wohnbezirke unter Verwendung der Zentroide erheblich von den realen Bedingungen abweicht. Zudem zeigen sie, dass die Gewichtung der Zentroide über die Einwohnerverteilung nur einen geringen zusätzlichen Genauigkeitsgewinn erzeugt.

Wie bereits gezeigt, werden Entfernungen und damit Reisezeiten in einem Vektormodell (Gemeinden, Kreise etc.) im Vergleich zu einem Rastermodell überschätzt (Hillsman & Rhoda 1978; Dalvi & Martin 1976). Diese Befunde wurden auch am Beispiel der 314 Gemeinden umfassenden Region Masowien (PL) bestätigt (Stępniaik & Rosik 2015, S. 227). In dieser Untersuchung wurden Potenzialindikatoren unter Verwendung realer Reisezeiten im MIV berechnet und drei Aggregationsverfahren verglichen. Im ersten Ansatz werden die Indikatoren auf Ebene von Zentroiden für alle Gemeinden berechnet (1). Im zweiten Ansatz erfolgt eine gewichtete Mittelwertbildung der Indikatoren für jede Gemeinde unter Verwendung eines 1-Km Rasters (2). Um etwaige Fehler bei der Mittelwertbildung zu vermeiden, wurde ein weiteres Verfahren entwickelt, welches nicht die Indikatorwerte, sondern die Reisezeiten gewichtet (3). Die Ansätze eins und zwei sind eng an Hewko *et al.* (2002) angelehnt und ermöglichen insofern vergleichende Analysen unter Realbedingungen im Straßennetz. Das Untersuchungsgebiet ist hier jedoch wesentlich größer und es kommt zudem ein homogenes Rastermodell zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede zwischen Ansatz eins sowie den Ansätzen zwei und drei erheblich sind, eine hohe räumliche Auflösung die Aggregationsfehler also deutlich reduziert (Stępniaik & Rosik 2015, S. 234, 235). Der Unterschied zwischen den Modellen zwei und drei ist hingegen wesentlich geringer. Dies zeigt, dass die Art der

Mittelwertgewichtung keinen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Erreichbarkeitswerte hat. Die Unterschiede entstammen vermutlich nicht den unterschiedlichen Selbstpotenzialen, sondern den komplexen Verbindungen zwischen Gemeinden, welche nur kleinräumig abgebildet werden können.

Bisher haben sich jedoch keine Untersuchungen der Frage gewidmet, ob die Verwendung eines 100-Meter- oder eines 500-Meter-Rastermodells zu einer weiteren Reduktion von Aggregationsfehlern beiträgt. Ungeklärt ist außerdem, welche Wirkung das Zentroidproblem in den einzelnen Verkehrsmodi und insbesondere im ÖPNV entfaltet. Offen ist auch, ob einzelne Erreichbarkeitsindikatoren von diesem Aggregationsfehler besonders betroffen sind.

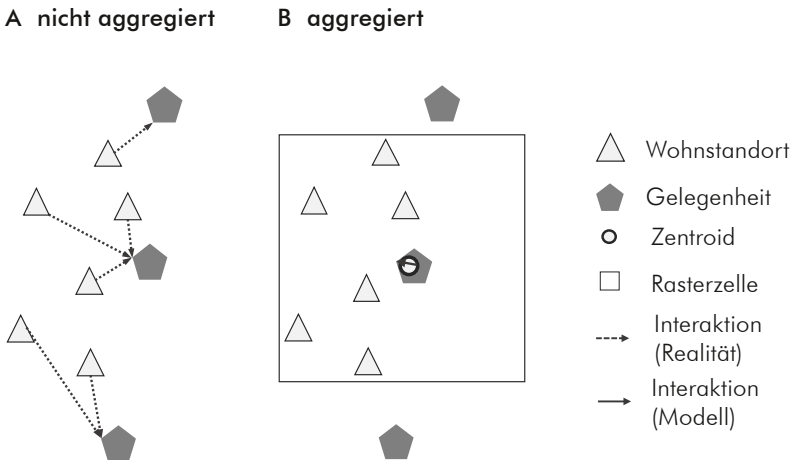
Das Eigenpotenzialproblem

Das Eigenpotenzialproblem (engl. selfdistance problem) steht mit dem Zentroidproblem in enger Verbindung und wurde 1976 erstmals diskutiert. Es beschreibt den Verlust an Informationen über Interaktionen innerhalb einer Raumeinheit (Hillsman & Rhoda 1978, S. 76). Zumeist werden alle Interaktionen innerhalb einer Raumeinheit nicht berücksichtigt oder als konstant angenommen. Hier beschreibt das Eigenpotenzialproblem Fehler bei der Entfernungsberechnung zwischen einer Raumeinheit und einer Gelegenheit innerhalb dieser Einheit, dem sogenannten Eigen- oder Selbstpotenzial (Hewko *et al.* 2002, S. 1189). Laut Hillsman & Rhoda (1978, S. 76) tritt dieser als Fehler B bezeichneten Aggregationsfehler auf, wenn eine Gelegenheit genau auf dem Zentroiden einer Raumeinheit liegt. Bei der Aggregation von Wohnstandorten zu einer Rasterzelle entstehen beispielsweise unrealistisch kurze Distanzen zu nächsten Gelegenheiten, wenn diese in unmittelbarer Nähe des Zentroiden liegen (vgl. Abbildung 17). Wenngleich Hillsman & Rhoda (1978) eben jene Fälle eines deutlichen Unterschätzens realer Distanzen antizipiert haben, sind auch Fälle einer Überschätzung denkbar.

Hewko *et al.* (2002, S. 1195) haben gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit von Eigenpotenzialen mit der Menge der Gelegenheiten zunimmt. Zudem erhöhen auch große Raumeinheiten die Wirksamkeit des Eigenpotenzialproblems (Warntz 1979, S. 11). In regionalen Erreichbarkeitsmodellen tritt dieser Effekt insbesondere dann auf, wenn für Landkreise

oder Gemeinden die Reisezeiten zu nächsten Gelegenheiten der Daseinsvorsorge oder zu zentralen Orten berechnet werden. Umfangreiche Selbstpotenziale verhindern in diesen Modellen eine realistische Reisezeitberechnung im Nahraum. Eine Reduzierung des Eigenpotenzialproblems ist hingegen nicht über die Einwohnergewichtung der Zentroide zu erzielen. Auch Condeço Melhorado *et al.* (2016, S. 310) betonen, dass gerade in Städten mit einer dispersen Bevölkerungsstruktur, einer hohen Verkehrsbelastung und einem ausdifferenzierten Transportsystem nur eine hohe räumliche Auflösung Abhilfe leistet.

Abbildung 17: Funktionsweise des Eigenpotenzialproblems



Quelle: eigene Darstellung

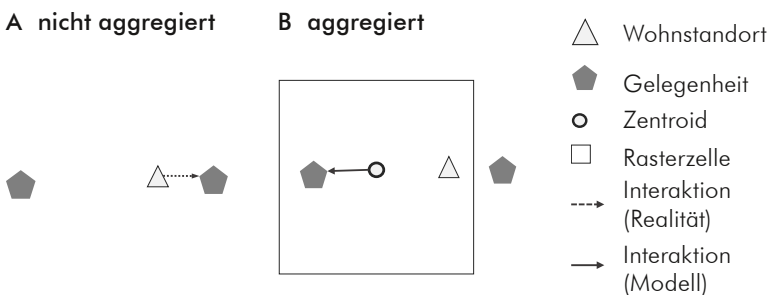
Das Grenzproblem

Das Zentroidproblem führt zu einer Fehleinschätzung von Raumwiderständen zwischen Zentroiden und Gelegenheiten. Die Zuordnung der Zentroide zu den nächsten Gelegenheiten ist jedoch korrekt. Beispielsweise wird bei der Berechnung des Raumwiderstandes zum nächsten Oberzentrum jedem Zentroiden das richtige Oberzentrum mit einer fehlerhaften Reisezeit zugeordnet. Das Grenzproblem führt hingegen zu einer fehlerhaften Zuordnung der Zentroide zu den nächsten

Gelegenheiten. Dieser Effekt tritt auf, wenn einem Zentroiden und einem Wohnstandort unterschiedliche Gelegenheiten nächstgelegen sind (vgl. Abbildung 18).

Auch dieses als Fehler C bezeichnete Problem wurde erstmals von Hillsman & Rhoda (1978, S. 77) beschrieben. Die Fehlllokation von Zentroiden und Raumeinheiten führt demnach immer zu einem Überschätzen von Raumwiderständen und folglich zu einem Unterschätzen von Erreichbarkeitswerten. Das Grenzproblem adressiert den Zusammenhang zwischen der Raumeinteilung und einem Erreichbarkeitswert, weist also große Überschneidungen mit dem Zoneneffekt auf. Demnach ist das Grenzproblem gerade dann besonders ausgeprägt, wenn unregelmäßige Raumeinheiten wie Gemeinden und Kreise als Raumbezugssystem verwendet werden. Zudem fällt dieser Aggregationsfehler gerade auf kurzen Distanzen besonders ins Gewicht (ebd., S. 85). Entsprechend groß ist die Bedeutung für die Naherreichbarkeit im Bereich der Daseinsvorsorge. Hewko *et al.* (2002, S. 1203) kommen jedoch zu dem Schluss, dass das Grenzproblem in Gemeinden und Kreisen eher zu vernachlässigen ist, da Versorgungseinrichtungen zumeist innerhalb diese Gebiete liegen, also primär das Eigenpotenzialproblem eine Wirkung entfaltet. Relevant ist das Grenzproblem bei der Verwendung eines kleinräumigen Rasters, da hier eine höhere Wahrscheinlichkeit von Fehlllokationen besteht. Da bei kleinräumigen Rastern jedoch nur geringe absolute Abweichungen bei den ermittelten Raumwiderständen auftreten, sind sie nur auf kurzen Distanzen relevant.

Abbildung 18: Funktionsweise des Grenzproblems



Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Current & Schilling (1987, S. 99)

2.2.3.4 Der Umgang mit Aggregationsfehlern

Skalen- und Zoneneffekte können zu umfangreichen Aggregationsfehlern in räumlichen Modellen führen. Die Wahl des Raumbezugsystems und die Aufbereitung von Erreichbarkeitskarten sollen immer auch die Minderung von Aggregationsfehlern unterstützen. Grundsätzlich sind technische und kartographische Lösungen zu unterscheiden.

Hohe räumliche Auflösung

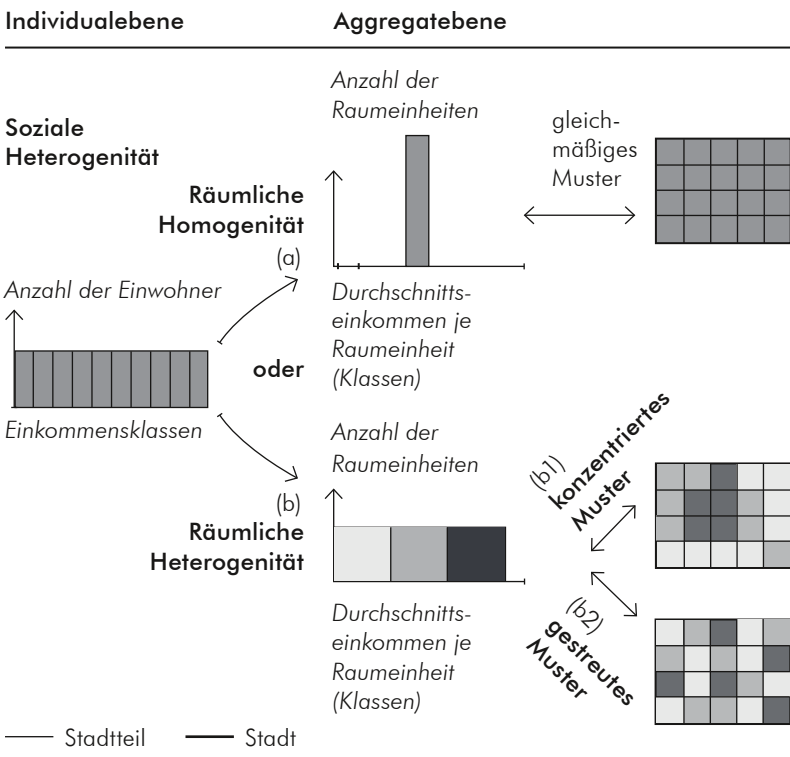
Durch die Verwendung einer hohen räumlichen Auflösung ist es möglich, die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Wirkstärke von Aggregationsfehlern zu reduzieren (Fotheringham 1989). Insofern ist es naheliegend, die Auflösung von Erreichbarkeitsmodellen zu erhöhen, um ihre Fehleranfälligkeit zu reduzieren (Hewko *et al.* 2002, S. 1188). Da sich sowohl die Datenverfügbarkeit als auch die Leistungsfähigkeit von Computern in den letzten Jahrzehnten stetig verbessert haben, ist ein Trend zu immer höher aufgelösten Erreichbarkeitsmodellen nicht verwunderlich (vgl. Abschnitt 2.2.2). Indes wird deutlich, dass sich die Praxisintegration solcher Modelle aufgrund der zunehmenden Komplexität weiter erschwert (vgl. Abschnitt 1.4). Dieser Befund ist im regionalen Kontext besonders drängend, da sich regionale Erreichbarkeitsmodelle durch die hohe räumliche Auflösung großer Untersuchungsräume auszeichnen.

Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, wird die Verwendung einer am Untersuchungsgegenstand ausgerichteten Skalierung vorgeschlagen (Openshaw 1996, S. 65). Madelin *et al.* (2009, S. 647) unterscheiden zwischen den Grundraumeinheiten (Individuen, Wohnstandorte, Gelegenheiten), der Analyseebene (Raster, Verkehrszellen, Gemeinden etc.) und der Ausprägungsebene. Als Ausprägungsebene wird das Gebiet bezeichnet, auf der »*ein Phänomen tatsächlich räumlich organisiert ist*« (ebd., S. 647). Diese Unterscheidung ist wichtig, da jede Ebene unterschiedliche politische Fragestellungen und Handlungsansätze berührt. Abbildung 19 zeigt diesen Zusammenhang auf Basis einer fiktiven Gleichverteilung von Einkommensklassen. Der Zoneneffekt erzeugt eine räumliche Homogenität, wenn diese Gleichverteilung in den einzelnen Zonen bestehen bleibt, also in jeder Zone identische Durchschnitte gebildet werden. Eine Erreichbarkeitskarte zeigt dann keine räumlichen Konzentrationen. Die Zonierung kann aber auch eine räumliche

Heterogenität generieren, die ihrerseits zu unterschiedlichen räumlichen Mustern führt. Ein konzentriertes Muster verweist eher auf eine Disparität auf einer höheren Entscheidungsebene (beispielsweise Einkommensungleichheiten zwischen Stadtteilen oder Gemeinden) wohingegen ein gestreutes Muster Unterschiede auf der Analyseebene oder den Einfluss einer niedrigeren Entscheidungsebene signalisiert (ebd., S. 647ff.).

In mehreren Studien wurde gezeigt, dass kleinräumige Analysen nicht immer in der Lage sind, Veränderungsprozesse ausreichend genau zu erklären (Irwin *et al.* 2006; Kok *et al.* 2001). Es wurde aber auch gezeigt, dass kleinräumig modellierte Einflussfaktoren wie die Arbeitsplatz-erreichbarkeit und die Entfernung zu Bahnhöfen zu einem besseren

Abbildung 19: Einfluss von Zonen- und Skaleneffekten auf räumliche Phänomene



Quelle: Madelin *et al.* (2009, S.647) nach ESPON (2006, S.XXVI)

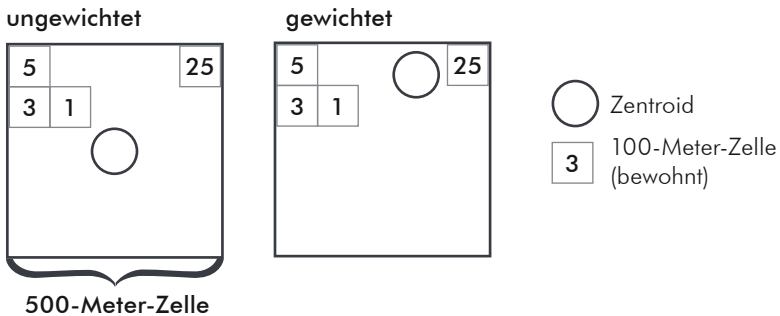
Verständnis der Landnutzung beitragen (Jacobs-Crisioni *et al.* 2014). Die Landnutzung wird nicht auf Ebene von Wohnblöcken oder statistischen Einheiten reguliert, sondern im kommunalen und regionalen Sektor. Für politische Entscheidungen ist relevant, dass das MAUP eine falsche Entscheidungsebene adressieren kann oder Disparitäten vollständig einebnet bzw. transformiert. Entsprechend sind die gezeigten Effekte bei der Raumeinteilung und Ergebnisinterpretation stets zu berücksichtigen. Gleichwohl kann das MAUP nicht nur als Problem, sondern auch als Chance für zusätzliche Erkenntnisgewinne verstanden werden (Madelin *et al.* 2009, S. 654).

Eine weitere am Untersuchungsgegenstand orientierte Einteilung des Raumbezugssystems basiert auf dem Quadtree Algorithmus (Moeckel & Donnelly 2015; Molloy & Moeckel 2017). Bei diesem Ansatz wird nur in Gebieten mit zahlreichen Raumeinheiten und Gelegenheiten eine hohe räumliche Auflösung verwendet. Umgesetzt wird dieser Ansatz unter Verwendung eines unterschiedlich aufgelösten homogenen Rastermodells. Kleinere Rasterzellen werden nur dort erzeugt, wo Gelegenheiten tatsächlich vorhanden sind. Dabei wird beispielsweise jede Rasterzelle in vier gleiche Teile unterteilt, wenn sie mindestens zwei Gelegenheiten enthält (ebd., S. 3). Solche Raumbezugssysteme kommen zumeist bei integrierten Verkehrsmodellen zur Anwendung. In regionalen Erreichbarkeitsmodellen stehen der Verwendung des Quadtree Algorithmus hingegen die unzureichende Interpretierbarkeit und Ungleichzeitigkeit von Aggregationsfehlern in zentralen und dezentralen Lagen entgegen.

Rastermodelle und einwohnergewichtete Zentroiden

Um das Auftreten von Aggregationsfehlern zu reduzieren, wird insbesondere die Verwendung homogener regelmäßiger Raumbezugssysteme vorgeschlagen und damit auch die Abkehr von administrativen Einheiten propagiert (Benenson *et al.* 2017b, S. 215; Pooler 1987, S. 274). Rastermodelle unterschiedlicher Auflösung sind heute ein in der Erreichbarkeitsmodellierung weitverbreitetes Raumbezugssystem (vgl. Abschnitt 2.3.3.2) (Ahlmeyer & Wittowsky 2018; Benenson *et al.* 2017b; Peter & Gertz 2017). Diese sind in der Regel quadratisch aufgebaut. Mitunter kommen auch Hexagone zum Einsatz (Schwarze 2015, S. 196). Rastermodelle haben den Vorteil, dass die Raumeinheiten immer Voronoi-

Abbildung 20: Einwohnergewichtung von Rasterzellen



Quelle: eigene Darstellung

Polygone¹⁵ (auch: Thiessen-Polygon) entsprechen und Zoneneffekte reduzieren. Die Vorteile eines kleinräumigen Rastermodells im Vergleich zu aggregierten Verkehrszellen wurden am Beispiel von Tel Aviv ausführlich gezeigt (Benenson *et al.* 2017b). Die Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass die Stärke der Aggregationsfehler auf Rasterebene wesentlich geringer ist (ebd., S. 228). Die Verwendung geometrischer Rastermodelle im regionalen Kontext erzeugt allerdings einen hohen Arbeitsaufwand bei der Datenbereitstellung. Nach wie vor sind gerade Gemeinden die klassische Gebietskulisse, auf Basis derer Raumstruktur- aber auch Verkehrsdaten bereitgestellt werden. Entsprechend sind unterschiedliche Techniken anzuwenden, um Raumstrukturdaten in kleinräumige Rastermodelle zu übertragen (vgl. Abschnitt 3.4).

Um insbesondere die Wahrscheinlichkeit von Grenzproblemen zu reduzieren, wird außerdem die Verwendung gewichteter Zentroide vorgeschlagen (Prinz & Herbst 2008, S. 8; Schwarze 2015, S. 118). Die Gewichtung erfolgt zumeist über die Verteilung der Einwohner innerhalb einer Raumeinheit (vgl. Abbildung 20). Anschließend bestimmt ein Algorithmus, wie stark die räumliche Nähe und das Gewicht (Potenzial) die Lage des Zentroiden beeinflussen. Hewko *et al.* (2002, S. 1195) zeigen jedoch, dass die Verwendung einwohnergewichteter Zentroide nur zu einer geringen Reduzierung von Aggregationsfehlern führt und

15 In einem Voronoi-Polygon liegt jeder Punkt näher am Zentroiden des eigenen Polygons, als am Zentroiden eines Nachbarpolygons.

insbesondere unrealistisch kurze Distanzen weiterhin bestehen bleiben (Fehler B; Eigenpotenzialproblem). Insofern soll auch in dieser Arbeit beantwortet werden, ob und in welchem Umfang die Nutzung gewichteter Zentroide zu einer Reduktion von Aggregationsfehlern beiträgt.

Kartographische Lösungsansätze

Zur Reduzierung des MAUP in Kartendarstellungen werden unterschiedliche Lösungsansätze vorgeschlagen. Diese beziehen sich lediglich auf die Aufbereitung und Darstellung von Raumstrukturdaten und bieten insofern nur indirekte Hinweise bezüglich des Umgangs in Erreichbarkeitsuntersuchungen. Mögliche Ansätze sind die Verwendung von Gauß-Filtern zur Glättung von Indikatorwerten (Salze *et al.* 2011, S. 7, 8) und die Kartographie von Quoten und ihrer Bezugsgrößen (Madelin *et al.* 2009, S. 655ff.). In solchen Karten werden unter anderem Gebiete in Punkte unterschiedlicher Größe übersetzt. Die Punktgröße hängt dann von einer Bezugsgröße ab (etwa der Bevölkerungszahl). Die Farbgebung wird hingegen vom Indikatorwert bestimmt. Im Unterschied zur üblichen Choroplethen-Darstellung, also der Darstellung in der Ebene, ist die absolute Bevölkerungszahl eines Gebietes wichtiger als die Gebietsgröße, um einen Indikatorwert richtig zu interpretieren. Auch das sogenannte Gridding, also das Übersetzen von Raumzusammenhängen in ein Raster, wird zur Reduzierung des MAUP vorgeschlagen (ebd., S. 658). Zu den Vorteilen gehören die Möglichkeit einer sehr hohen Auflösung sowie die Entkopplung von administrativen Einheiten, welche ihrerseits die darstellbare Raumstruktur zu erheblichen Teilen determinieren. Dies ist auch wichtig, da die Zelleinteilung in städtischen Gebieten mit jener in ländlichen Gebieten identisch sein muss, um Fehler und Fehlinterpretationen zu vermeiden (Curl *et al.* 2015, S. 94).

Vielversprechend sind außerdem die Entwicklungen in der interaktiven Kartographie (Madelin *et al.* 2009, S. 658). Diese profitiert von der zunehmenden Verbreitung von Internetportalen bei der Bereitstellung von Rauminformationen. Der interaktive Ansatz erlaubt die Entkopplung von der gedruckten Karte und ermöglicht es den Nutzern, Rauminformationen auf unterschiedlichster Ebene mit wenigen Mausclicks zu erzeugen. Insofern lassen sich MAUP über die Kombination unterschiedlicher Kartendarstellungen reduzieren.

2.2.4 Rechenzeit und Speicherbedarf

In Abschnitt 2.2.3 wurde erörtert, welche Aggregationsfehler in Erreichbarkeitsmodellen auftreten können und wie eine hohe räumliche Auflösung diese reduziert. Mit einer höheren räumlichen Auflösung steigt jedoch unmittelbar die Anzahl der Raumeinheiten. Für jede einzelne Raumeinheit müssen geometrische Informationen und weitere Attribuerungen vorliegen. Folglich erhöht die Menge der Raumeinheiten den Aufwand für die Datenbeschaffung, -aufbereitung und -validierung (vgl. Abschnitt 2.2.5). Eine zunehmende Auflösung verursacht jedoch vor allem längere Rechenzeiten und einen höheren Speicherbedarf und erfordert außerdem ein besonderes Expertenwissen.

Die Abhängigkeit der Anzahl an Raumeinheiten von der räumlichen Auflösung ist am Beispiel Hamburgs in Tabelle 6 aufgeführt. Die Angaben zeigen, dass eine zunehmende Detaillierung des Rastermodells zu einem deutlichen Anstieg der Raumeinheiten führt. Da in jeder 500-Meter-Zelle insgesamt 25 Zellen mit einer Kantenlänge von 100 Metern liegen, erhöht sich die Menge der Raumeinheiten ebenfalls um den Faktor 25. Die ausschließliche Berücksichtigung bewohnter 100-Meter-Zellen reduziert die Menge der Einheiten um rund 60%. Eine weitere Steigerung der Auflösung auf ein 10-Meter-Raster würde die Zahl der Raumeinheiten zusätzlich um den Faktor 100 erhöhen. Im Vergleich zu den administrativen Gebieten auf Vektorebene zeigt sich, dass bereits ein 500-Meter-Raster hinsichtlich der Auflösung nur noch von den Baublöcken, ALKIS-Gebäudedaten (Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem) und Adressen übertroffen wird. Räumliche Analysen auf Basis eines Vektormodells unter Berücksichtigung administrativer Gebiete können nur bis zur Baublockebene durchgeführt werden, da die Adress- und ALKIS-Daten einen nicht mehr handhabbaren Datenumfang bedeuten.

Ein Hindernis ist der deutliche Anstieg der Rechenzeiten. Diese beeinflusst die Berechnungsdauer, den Aufwand bei der Fehlerkorrektur und die Möglichkeit zur Echtzeitberechnung von Szenarien. Bei einem Wechsel von einem 500-Meter- auf ein 100-Meter-Raster erhöht sich die Anzahl der Raumeinheiten – wie bereits gezeigt – um den Faktor 25. Die Menge der zu berechnenden Quell-Ziel-Beziehungen erhöht sich

hingegen um den Faktor 625 (25²). Zwar sind in der Regel nicht alle denkbaren Quell-Ziel-Beziehungen zu berechnen, dennoch zeigt sich hier exemplarisch der Zusammenhang zwischen der räumlichen Auflösung und dem Rechenaufwand.

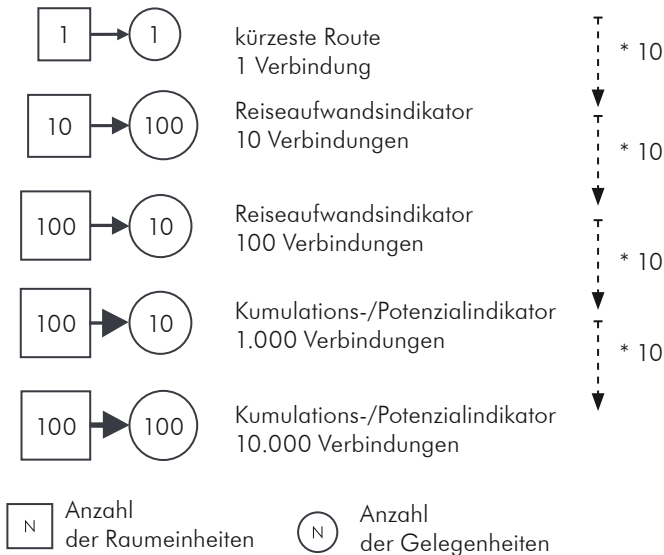
Abbildung 21 zeigt den Einfluss der verwendeten Auflösung und der berücksichtigten Erreichbarkeitsindikatoren auf die Anzahl der zu berechnenden Verbindungen. Für die kürzeste Strecke zwischen einer Raumeinheit und einer Gelegenheit ist lediglich eine Verbindung zu berechnen werden (1-zu-1). Werden die kürzesten Routen zu nächsten Gelegenheiten berechnet (Reiseaufwandsindikator), entspricht die Menge der Verbindungen der Anzahl der Raumeinheiten (n-zu-1). Verdoppelt sich die Anzahl der Raumeinheiten, verdoppelt sich auch die Menge der kürzesten Verbindungen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass sich auch die Rechenzeit verdoppelt da diese, je nach genutztem Routingverfahren, auch von der Menge der Gelegenheiten, den Distanzen und etwaigen gemeinsam genutzten Routen abhängt. Für die Berechnung von Kumulations- und Potenzialindikatoren sind im Maximalfall (hohes oder unbegrenztes Reisebudget) für jede Raumeinheit die kürzesten Wege zu allen Gelegenheiten zu ermitteln (1-zu-n) (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Wenn in einem Untersuchungsgebiet 10 Raumeinheiten und 10 Gelegenheiten liegen, muss zur Berechnung des Reiseaufwandsindikators für jede Raumeinheit eine beste Verbindung zur nächsten Gelegenheit berechnet werden. Insgesamt sind also 10 Wege zu ermitteln. Ein Kumulationsindikator würde hingegen auf 10 Verbindungen

Tabelle 6: Raumeinheiten und räumliche Auflösung am Beispiel Hamburgs

Vektor- und Standortmodelle	Rastermodelle (Beispiele)
7 Bezirke	30 Zellen (5-Kilometer)
104 Stadtteile	760 Zellen (1-Kilometer)
941 Statistische Gebiete	3.009 Zellen (500-Meter)
8.658 Baublöcke	12.081 Zellen (250-Meter)
277.615 Adressen	31.153 Zellen (100-Meter, bewohnt)
365.126 Gebäude	75.509 Zellen (100-Meter)
~974 Tsd. Haushalte	7.5 Mio. Zellen (10-Meter)

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 21: Raumeinheiten, Indikatoren und Anzahl der Verbindungen



Quelle: eigene Darstellung

je Raumeinheit und somit 100 Einzelwegen basieren. Wenn sich die Anzahl der Raumeinheiten und der Gelegenheiten auf jeweils 100 erhöht, steigt die Menge der Verbindungen für den Reiseaufwandsindikator um den Faktor 10 bzw. auf ebenfalls 100. Für einen Kumulationsindikator muss dann aber mit 10 Tsd. Relationen eine um den Faktor 100 höhere Menge an Wegen berechnet werden. Entsprechend würde es die Berücksichtigung von Kumulationsindikatoren erfordern, mit der 100-fachen Menge an Verbindungen umzugehen. Es besteht also ein enger Zusammenhang zwischen der räumlichen Auflösung und den zu berechnenden Erreichbarkeitsindikatoren.

Mit der Anzahl der Raumeinheiten korrespondiert auch der Speicherbedarf für die einzelnen Geometrien. Dieser ist entscheidend, wenn (vor-)berechnete Verbindungen gespeichert werden. Sowohl der in dieser Arbeit verwendete Modellaufbau (vgl. Abschnitt 3.3) als auch jener, der im DVAN verwendet wird, basieren auf solchen vorberechneten Verbindungen (Peter 2019, S. 249). Erreichbarkeitsindikatoren des ÖPNV

werden in diesen Modellen mit Hilfe vorab berechneter Matrizen auf Ebene von Haltestellenbereichen erzeugt. Das Modell der MRH umfasst 29.615 Haltestellenbereiche und, je nach Zeitfenster, rund 80 Millionen Verbindungen. Im DVAN werden Verbindungen auf Ebene unterschiedlicher Rastermodelle (100-Meter, 500-Meter, 1-Kilometer) vorberechnet, um dem Anwender die Möglichkeit zur eigenen Szenarienberechnung zu geben (ebd., S. 257). In dem Modell des DVAN beinhaltet die Matrize des ÖPNV auf Ebene von Rasterzellen etwa 1,8 Mrd. Zeilen und erzeugt einen Speicherbedarf von 133 Gigabyte. Der Austausch solcher Datenmengen und die performante Berechnung der Erreichbarkeitsindikatoren stellen die Modellentwickler und -anwender vor große Herausforderung. Insofern ist zu hinterfragen, ob eine Reduzierung der räumlichen Auflösung oder die Berechnung einfacher Erreichbarkeitsindikatoren die Nutzbarkeit eines Erreichbarkeitsmodells so stark erhöhen, dass die resultierenden Genauigkeitsverluste zu vernachlässigen sind.

2.2.5 Datenverfügbarkeit und Datenaufbereitung

Ein Erreichbarkeitsmodell basiert in der Regel auf zahlreichen Bevölkerungs- und Raumstrukturdaten. Gerade in regionalen Erreichbarkeitsmodellen ist es jedoch schwierig, die nötigen Daten zusammenzutragen und aufzubereiten. Im folgenden Abschnitt werden die allgemeinen und besonderen Datenanforderungen dargestellt und vor dem Hintergrund regionaler Modelle diskutiert.

Datenanforderungen

Unabhängig vom Untersuchungsraum sind die folgenden Anforderungen beim Aufbau der Strukturdatenbasis zu berücksichtigen:

- vom Untersuchungsgegenstand abhängige Datenbasis
- einheitliche Aktualität und räumliche Auflösung der Datengrundlagen
- dem Untersuchungszweck entsprechende räumliche Auflösung der Daten
- keine inadäquaten finanziellen Aufwendungen bei der Datenbeschaffung
- keinen inadäquaten Arbeitsaufwand bei der Datenaufbereitung

Eine vollständige Datenbasis beinhaltet alle das Untersuchungsinteresse berührende Themenbereiche. Beispielsweise kann die Versorgung mit medizinischen Einrichtungen nicht allein über Hausärzte bewertet werden. Auch der Einzelhandel sollte nicht ausschließlich über Standortdaten von Discountern abgebildet werden. Bei der Verwendung unterschiedlicher Raumstrukturdaten aus teilweise verschiedenen Quellen muss außerdem eine einheitliche Aktualität und Auflösung der Daten gewährleistet sein. Folglich hängen die Wahl des Raumbezugssystems und die Auflösung der Gelegenheiten eng mit den vorhandenen Datenquellen und der Datenverfügbarkeit zusammen. Zudem lässt sich auch aus dem Untersuchungsinteresse auf eine Mindestauflösung schließen (vgl. Abschnitt 2.2.3.4). Beispielsweise manifestiert sich Mobilitätsarmut primär auf Ebene von Individuen und Haushalten, während soziodemographische Merkmale zumeist nur auf Stadtteil- oder Gemeindeebene verfügbar sind (Karner & Niemeier 2013, S. 129). Dies führt auch dazu, dass Auswertungen, welche sich primär der Mobilitätsarmut bzw. der mobilitätsbedingten Exklusion widmen, nur allgemeine Muster abbilden und keine kleinräumige Eingrenzung des Phänomens vornehmen (Grengs 2010; Wieland & Dittrich 2016). Diese Konstellationen treten auf, wenn Erreichbarkeiten nur für einzelne Personengruppen berechnet werden und der Wohnort dieser Personengruppen gleichzeitig unklar ist.

Die genannten Anforderungen können gerade in regionalen Erreichbarkeitsmodellen einen erheblichen Finanzbedarf und Arbeitsaufwand erzeugen. Dies bedeutet jedoch, dass beim Aufbau der Datenbasis auch finanzielle Restriktionen und das vorhandene technische Know-how zu berücksichtigen sind. Dies kann dazu führen, dass Fragestellungen zumindest auf regionaler Ebene nicht beantwortet werden können. Auf der anderen Seite bieten von unterschiedlichen Planungsträgern eingesetzte regionale Erreichbarkeitsmodelle die Chance, auf eine breitere Finanzierungsbasis zuzugreifen und dabei keinen deutlichen Mehraufwand zu produzieren (vgl. Abschnitt 1.4).

Bedeutung in regionalen Erreichbarkeitsmodellen

Der Aufbau und die regelmäßige Aktualisierung einer Datenbasis unter Berücksichtigung der vorgenannten Anforderungen sind gerade in regionalen Erreichbarkeitsmodellen deutlich erschwert. Grundsätzlich lassen sich allgemeine und speziell im regionalen Kontext auftretende

Hindernisse identifizieren. Zu den grundsätzlichen Hindernissen gehören:

- fehlende Daten
- geringe Aktualität der Daten
- geringe räumliche Auflösung der Daten
- Bereitstellung von Adressdaten und notwendige Georeferenzierung
- hohe Kosten bei kommerziellen Datenanbietern

Dabei handelt es sich um in allen räumlichen Modellen auftretende Hemmnisse. Entsprechend sind Lösungsansätze etabliert, die einen Umgang mit diesen Widerständen ermöglichen (vgl. Abschnitt: Lösungsansätze). Es existieren jedoch weitere Hürden, die so nur in regionalen Erreichbarkeitsmodellen auftreten:

- sehr zeitaufwendige händische Anpassungen
- fehlendes lokales Wissen
- Häufigkeit von Sonderfällen
- unterschiedliche Zuständigkeiten

Der Umgang mit einer mangelnden Datenverfügbarkeit ist gerade in regionalen Modellen relevant, da aufgrund der Gebietsgröße zumeist keine händische Georeferenzierung möglich ist. Dies betrifft auch die Datenaufbereitung, die ebenfalls über automatisierte Verfahren umzusetzen ist, da die Größe regionaler Untersuchungsgebiete und die Menge an Raumeinheiten und Gelegenheiten einen übermäßigen Arbeitsaufwand erzeugen. Das fehlende lokale Wissen erschwert die Identifikation und Bereinigung von Fehlern durch den Modellentwickler. Daher sind Rückkopplungen zwischen Entwicklern und Anwendern notwendig, um die Validität der Daten zu gewährleisten. Dieser Schritt erhöht jedoch den Aufwand bei der Datenbereitstellung und erfordert die Organisation und Etablierung entsprechender Routinen. Eine weitere Besonderheit ist die Häufigkeit von Sonderfällen, die auch aufgrund des fehlenden lokalen Wissens vielfach nicht während der erstmaligen Datenaufbereitung erkannt werden. Diese Sonderfälle nehmen mit der Größe des Untersuchungsgebietes, der Menge administrativer Einheiten und der Anzahl an Gebietsgrenzen stetig zu. Unter anderem können von einzelnen Verkehrsunternehmen die elektronischen Fahrplandaten fehlen oder, wie im

Amt Neuhaus, die Zuständigkeiten im Bereich des öffentlichen Verkehrs bei Unternehmen außerhalb des Bundeslandes liegen.¹⁶ Gerade beim Aufbau von Landesgrenzen überschreitenden Erreichbarkeitsmodellen können unterschiedliche Verantwortlichkeiten die Vollständigkeit und Einheitlichkeit der Datenbasis reduzieren und somit einen zusätzlichen Arbeitsaufwand erzeugen. Dies betrifft in besonderem Maße jene sechs deutschen Metropolregionen, die sich auf das Gebiet von mindestens zwei Bundesländern erstrecken. Eine zusätzliche Relevanz erhält diese Konstellation bei der gewünschten Vermeidung von Kanteneffekten (engl. auch *island in the ocean problems* oder *edge effects*), also dem Abschneiden eines Erreichbarkeitsmodells an der Grenze des Untersuchungsgebietes (Sadler *et al.* 2011; Vandenbulcke *et al.* 2009). Um unrealistisch geringe Erreichbarkeitswerte in den Randgebieten zu vermeiden, werden die Raumstruktur und das Verkehrssystem innerhalb eines Puffers außerhalb des eigentlichen Untersuchungsgebietes vollständig erfasst. In der Regel wird die Erfassung aufgrund der Lage dieser Gebiete im Nachbarbundesland oder einem anderen Staatsgebiet deutlich erschwert (Fransen *et al.* 2015, S. 185, 186).

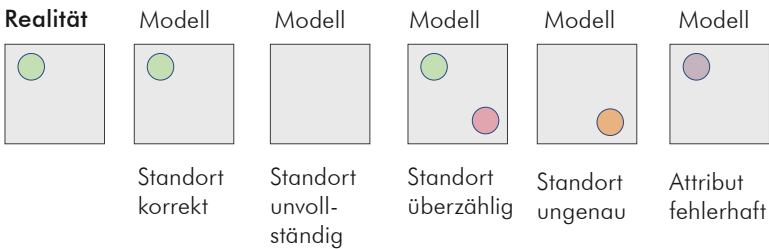
Datenfehler

Gerade in regionalen Erreichbarkeitsmodellen kann die Gebietsgröße zu unterschiedlichen Fehlern in den Geodaten führen. Fehler in den Standorten beziehen sich auf die räumlichen und Fehler in der Attributierung auf die inhaltlichen Eigenschaften der Standorte (vgl. Abbildung 22). Ein Standortdatensatz wird dann als korrekt angesehen, wenn keine Standorte fehlen, überzählig oder falsch verortet sind. Außerdem darf die Attributierung keine fehlerhaften Informationen enthalten. Die Vollständigkeit bezieht sich hier jedoch ausschließlich auf den Untersuchungsgegenstand. Bei Erreichbarkeitsuntersuchungen unterschiedlicher Schultypen, muss für alle Standorte zumindest der korrekte Typ vorhanden sein. Wenn nicht explizit gefordert, sind keine weiteren Informationen vorzuhalten.

16 Die vertragsärztliche Versorgung des Amtes Neuhaus in Niedersachsen wird durch die KV Mecklenburg-Vorpommern gewährleistet (http://kvmv.dgn.de/aerzte/15/20/40/Satzung_KVMV_Beschluss_05052010.pdf, letzter Zugriff: 26.06.2019)

Standorte sind immer dann unvollständig, wenn einzelne Einrichtungen fehlen. Mitunter sind auch überzählige Standorte in Datensätzen enthalten. Insbesondere dann, wenn bereits geschlossene Einrichtungen noch nicht entfernt wurden. Eine häufige Fehlerquelle sind vor allem falsch verortete Standorte. Dieser Fehler kann unter anderem bei einer fehlerhaften Georeferenzierung oder einer falschen Disaggregation von Standorten entstehen.

Abbildung 22: Datenqualitäten und Datenfehler



Quelle: eigene Darstellung

Lösungsansätze

Bevor ein großer Aufwand zur Erstellung einer Datenbasis mit hochauflösenden Standorten betrieben wird ist zu hinterfragen, welche Standorte mit welchen Angaben und in welcher Auflösung überhaupt benötigt werden. So führt eine geringere Auflösung des Raumbezugssystems zu einem geringeren Bedarf bei der Disaggregation von Bevölkerungsmerkmalen. Bisher werden unterschiedliche Ansätze genutzt, um mit den genannten Hemmnissen umzugehen. Es ist jedoch nicht möglich, das fehlende lokale Wissen auszugleichen oder alle Sonderfälle bereits vor der ersten Modellerstellung zu identifizieren. Die Verwendung freier Geodaten von OpenStreetMap (OSM) (OSM o.J.) ist die gängigste Methode, um Datenlücken zu füllen, kommerzielle Daten zu ersetzen, händische Nachbearbeitungen zu reduzieren und unterschiedliche Zuständigkeiten zu vermeiden. Sowohl in Deutschland als auch auf internationaler Ebene wurden in der Vergangenheit zahlreiche regionale Erreichbarkeitsmodelle auf Basis von OSM-Daten aufgebaut (Ahlmeyer & Wittowsky 2018; Büttner *et al.* 2018; Owen & Levinson 2015; Schwarze 2015). Die Qualität dieser Daten wurde in der Vergangenheit bereits

überprüft und als für die räumliche Modellierung geeignet eingestuft (Neis *et al.* 2012; Neis 2014). Abgesehen davon, stehen häufig ohnehin keine alternativen Datenquellen zur Verfügung.

Zur Disaggregation von Daten wird häufig ein Randsummenausgleich durchgeführt. Wenn für Gemeinden eine Altersklassifizierung der Bevölkerung vorliegt stellt sich beispielsweise die Frage, wie sich diese innerhalb der Gemeinden verteilen. Diese Verteilung kann unter anderem auf Basis höher aufgelöster Einwohnerzahlen oder Gebäude und Flächennutzungsdaten erfolgen (Spiekermann & Schwarze 2014, S. 48). Anschließend werden die Einwohner je Altersklasse direkt proportional zur kleinräumig vorhandenen Einwohnerzahl, Flächennutzung oder Bebauung so verteilt, dass die Gesamtsumme erhalten bleibt. Da vom Statistischen Bundesamt (Destatis) mittlerweile verschiedene soziodemographische Merkmale in einem 100-Meter-Raster angeboten werden, hat sich die Bedeutung dieses Ansatzes für die Erstellung einer synthetischen Bevölkerungsverteilung reduziert (Destatis 2018). Gleichwohl muss dieses Verfahren weiterhin angewendet werden, um aktuelle Fortschreibungsdaten auf das Zensusraster zu übertragen (vgl. Abschnitt 3.4.2).

2.2.6 Zwischenfazit: Die räumliche Auflösung in regionalen Modellen

Es zeigt sich der starke Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Menge der zu berechnenden Verbindungen in Abhängigkeit von den genutzten Erreichbarkeitsindikatoren. Eine höhere räumliche Auflösung wird angestrebt, um Aggregationsfehler in Erreichbarkeitsmodellen zu reduzieren. Gerade Skaleneffekte und das Zentroidproblem können dazu führen, dass die berechneten Erreichbarkeitswerte von den realen Bedingungen erheblich abweichen. Eine hohe räumliche Auflösung reduziert jedoch die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen. Gerade die Berechnung von Kumulations- und Potenzialindikatoren in hochaufgelösten Erreichbarkeitsmodellen erzeugt lange Rechenzeiten und einen hohen Speicherbedarf. Außerdem erschweren detaillierte Modelle die Beschaffung, Aufbereitung und Validierung der Geodaten. Es ist fraglich, ob eine Reduzierung der Aggregationsfehler diese Nachteile ausgleicht.

Zwar ist die Verwendung hochaufgelöster Modelle in großräumigen Untersuchungsräumen keine Ausnahme, dennoch blieb die fundierte Analyse des Zusammenspiels zwischen räumlicher Auflösung, Erreichbarkeitsindikatoren und Verkehrsgraphen bisher aus. Dabei zeigt sich, dass schon eine Reduzierung der Auflösung von einem 100-Meter- in ein 500-Meter-Raster die Anzahl der zu berechnenden Verbindungen erheblich reduziert. Zu hinterfragen ist außerdem, ob ein 100-Meter-Raster überhaupt einen nennenswerten Genauigkeitsgewinn erzielt.

2.3 Verkehrsgraphen

Im folgenden Abschnitt werden die Besonderheiten und Anforderungen bei der Modellierung der multi- und intermodalen Verkehrsgraphen vorgestellt. Abschnitt 2.3.1 liefert einen ersten allgemeinen Überblick. In den anschließenden Absätzen 2.3.2 und 2.3.3 liegt der Fokus auf der Modellierung des öffentlichen Verkehrssystems, da diese eine besonders große Herausforderung beim Aufbau von regionalen Erreichbarkeitsmodellen darstellt.

2.3.1 Die Bedeutung von Verkehrsgraphen in Erreichbarkeitsmodellen

Ein Netzwerk aus Knoten und Kanten wird als Graph bezeichnet. Die Eigenschaften des Verkehrsnetzes lassen sich mit unterschiedlichen Einschränkungen in einen solchen Verkehrsgraphen übersetzen (Barnes & Harary 1983). Beispielsweise werden Haltestellen und Kreuzungen als Knoten definiert, Strecken und Fahrplanfahrten hingegen als Kanten. Unterschiedliche Attribute ermöglichen es, den Kanten und Knoten Raumwiderstände zuzuordnen. Zu diesen gehören unter anderem die Länge, die Reisezeit und die Wartezeiten an Ampeln. Die Graphentheorie widmet sich verschiedenen Methoden, die die Eigenschaften von Graphen untersuchen und Kennzahlen aus den Beziehungen zwischen Knoten und Kanten ableiten. Ein klassischer Anwendungsfall ist die Suche eines besten Weges zwischen zwei Knoten bei einer gleichzeitigen Minimierung der Kanten- und Knotenwiderstände. Das bis heute zumeist verwendete Routingverfahren ist der Dijkstra-Algorithmus (Dijkstra 1959).

Mit dem Tür-zu-Tür-Ansatz wird in der Regel das Ziel verfolgt, wohnstandortbasierte Erreichbarkeitsindikatoren mit Hilfe einer hohen räumlichen Auflösung und detaillierter Verkehrsgraphen zu berechnen (Benenson *et al.* 2017a, S. 385). Dieser Ansatz macht beispielsweise die Berechnung von Gehzeiten zu Parkplätzen und Haltestellen, die Integration von Fahrplandaten und den Aufbau eines Fuß- und Radwegenetzes erforderlich (Salonen & Toivonen 2013, S. 144). Mit dieser Detaillierung ist es möglich, unterschiedliche Raumwiderstände mit einer hohen Genauigkeit und auf kleinräumiger Ebene zu berechnen. Daher wird in zahlreichen Erreichbarkeitsmodellen eine hohe räumliche Auflösung mit detaillierten Verkehrsgraphen kombiniert. Hochdetaillierte Verkehrsgraphen erzeugen jedoch gerade in regionalen Erreichbarkeitsmodellen lange Rechenzeiten, weitreichende Datenbedarfe und besondere Softwareanforderungen. Diese erfordern ein spezielles Expertenwissen und hemmen so den Einsatz in der Planungspraxis.

IV- und ÖV-Graphen: Unterschiede und Gemeinsamkeiten

Grundsätzlich ist zwischen den ungerichteten Verkehrsgraphen des Individualverkehrs und den gerichteten Graphen des öffentlichen Verkehrs zu unterscheiden. Die Kanten in einem Graphen des Individualverkehrs sind in beide Richtungen offen, können aber richtungsabhängige Raumwiderstände aufweisen. Einbahnstraßen sind als richtungsabhängig gesperrte Kanten im Modell integriert. Im Verkehrsgraphen des fahrplanbasierten öffentlichen Verkehrssystems können die Kanten nur zu einem bestimmten Zeitpunkt und in eine Richtung passiert werden (Farber *et al.* 2014, S. 149). Außerdem lassen sich Wege von Tür-zu-Tür nur auf einem intermodalen Verkehrsgraphen unter Einbeziehung der fußläufigen Haltestellenanbindung korrekt nachbilden. Die Bindung an Fahrplanzeiten, die Intermodalität und die damit einhergehende Komplexität von ÖV-Graphen führen zu zahlreichen Herausforderungen. Zu diesen gehören eine geringe Übersichtlichkeit, der Einsatz von Spezialsoftware und der arbeitsintensive Netzaufbau (Martin *et al.* 2002, S. 6).

Neben der reinen technischen Umsetzung unterscheidet sich die Widerstandsberechnung in den einzelnen Verkehrsmodi auch methodisch. Ziel ist es, für alle Nutzergruppen, Wegezwecke und Verkehrsmodi vergleichbare Raumwiderstände zu ermitteln. Die Raumwiderstände

im öffentlichen Verkehr ergeben sich primär aus dem Fahrplan. Abweichungen auf konkreten Wegen können unter anderem aus dem Reisekontext und der Fahrplankenntnis der Nutzer resultieren. Beispielsweise ist es auf ungeplanten Wegen nicht möglich, die Startwartezeit mit Hilfe einer Fahrplanorientierung zu reduzieren (Kujala *et al.* 2018). Auch kann das Mitführen von Gepäck die Anbindungs- und Umsteigezeiten und damit die Gesamtreisezeit verlängern.

Im MIV resultieren Reisezeitunterschiede primär aus den unterschiedlichen Netzbelastungen im Tages- und Wochenverlauf. Auch die Regelkonformität der Nutzer und hier insbesondere die Beachtung von Tempolimits beeinflusst die individuelle Reisezeit. Um diese tageszeitabhängig zu ermitteln, wird entweder auf regelbasierte Verfahren, Navigationsdaten oder Verkehrsmodelle zurückgegriffen (vgl. Abschnitt 3.5.2). In der Regel werden die Verkehrsgraphen des MIV in Erreichbarkeitsmodellen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Regeln aber ohne eine berechnete Verkehrsbelastung aufgebaut. Gegenstand dieser Regeln ist zumeist der Streckentyp (Tempolimit, Kapazität etc.) und der siedlungsstrukturelle Kontext (innerorts, Bebauungsdichte etc.).

Im NMIV und insbesondere im Radverkehr resultieren Geschwindigkeitsunterschiede zumeist aus individuellen Fähigkeiten. Zwar wird im SrV 2013¹⁷ ein durchschnittliches Geschwindigkeitsniveau im Radverkehr von etwa 11 bis 12 km/h angegeben (Ahrens *et al.* 2015a, Tab. 18), routinierte Radfahrer können diese aber deutlich überschreiten. Auch die Nutzung von Pedelecs oder S-Pedelecs (bis 45 km/h) können zu deutlich geringeren Reisezeiten führen. Zudem beeinflusst die Geländetopographie das Geschwindigkeitsniveau. Diese lässt sich aber nicht in einem zweidimensionalen Raum abbilden, sondern erfordert zusätzlich die Integration von Höhendaten (vgl. Abschnitt 3.5.3). Trotz dieser Einschränkungen ist es möglich, ein mittleres Geschwindigkeitsniveau zu modellieren, welches einzelne Nutzer aber deutlich über- oder unterschreiten können. Alternativ ist auch die in der Analyse umständliche Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzerprofile denkbar.

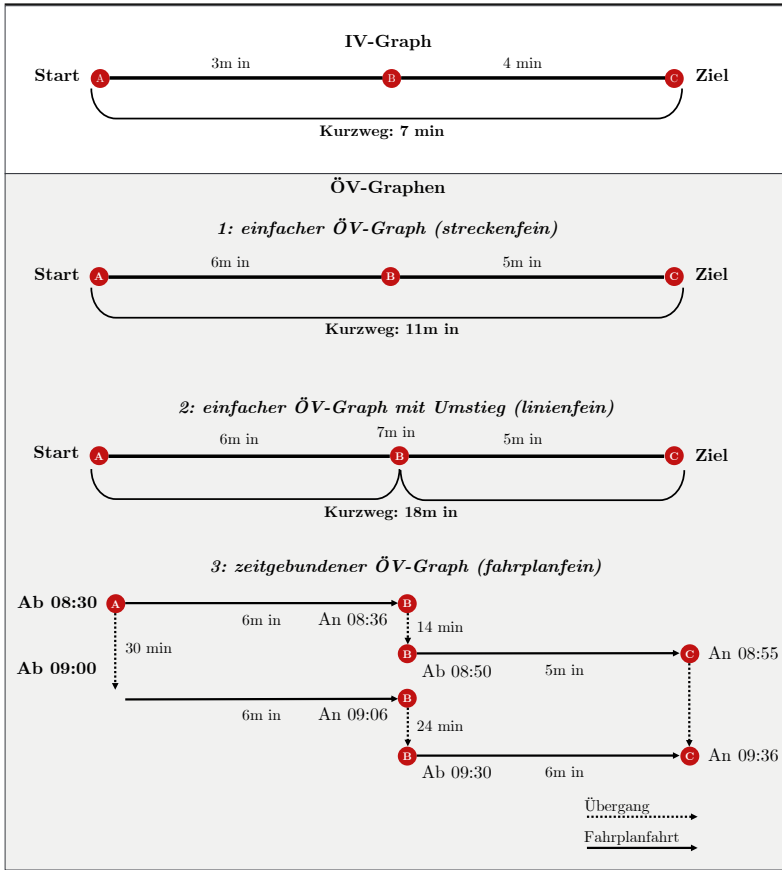
17 »Mobilität in Städten – Sr V 2013«: <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/srv-2013> (letzter Zugriff: 15.08.2019)

Mögliche Verkehrsgraphen des ÖV

Zur Berechnung von Raumwiderständen des öffentlichen Verkehrs müssen Fahrplandaten in Kantengewichte übersetzt werden. Prinzipiell lassen sich drei Verfahren zur Berechnung von Raumwiderständen im ÖV unterscheiden (vgl. Abbildung 23). Einfache ÖV-Graphen basieren auf Kantengewichten zwischen den einzelnen Haltestellen entlang von Linienverläufen und sind nicht an Fahrplanzeiten gebunden (Chen *et al.* 2016; Martin *et al.* 2002). Die Kantengewichtung erfolgt über verkehrsmittelabhängige Geschwindigkeitsprofile oder mittlere Fahrtzeiten zwischen den Haltestellen (streckenfeines Verfahren) (Salonen & Toivonen 2013, S. 147). Die Berücksichtigung mittlerer Fahrtzeiten erfordert indes die Verwendung von Fahrplandaten. Einfache und ungerichtete ÖV-Graphen erzeugen den geringsten Arbeitsaufwand und ermöglichen die Anwendung des Dijkstra-Algorithmus im ArcGIS NA. Eine Weiterentwicklung ist die Trennung unterschiedlicher Linien. Jede Linie erhält ihr eigenes Netz aus Kanten und Knoten sowie eigene Kantengewichte (Krizek *et al.* 2007). Diese Einzelnetze werden an den Haltestellen über Umsteigekanten verbunden. Eine Umsteigekante entspricht der Umsteigezeit an einer Haltestelle zwischen zwei Linien. Diese ergibt sich aus der genauen Fahrplanlage, einer mittleren Taktfolgezeit oder einer vorab definierten Konstanten (linienfeines Verfahren). Mit beiden Verfahren lassen sich Fahrplandaten schnell in einen übersichtlichen ÖV-Graphen mit geringen Rechenzeiten übersetzen (Schwarze 2015, S. 154). Diese einfachen Ansätze wurden bis etwa 2010 vorwiegend verwendet, da Datengrundlagen und Rechenleistungen für komplexere Ansätze häufig nicht zur Verfügung standen (Curtis & Scheurer 2010; Hess 2005; Martin *et al.* 2002).

Eine der bedeutsamsten Eigenschaften des ÖV ist die von der Tageszeit abhängige Reisezeit (Fayyaz & Liu 2016, S. 5). Diese ergibt sich aus der Fahrtzeit im Fahrzeug sowie der Wartezeit an Start- und Umsteigehaltestellen. Das in Abbildung 23 dargestellte Beispiel mit einer fiktiven Abfahrt um 08:00 Uhr kommt unter Berücksichtigung eines streckenfeinen ÖV-Graphen zu einer minimalen Reisezeit von 11 Minuten. Der linienfeine Graph würde hingegen eine minimale Reisezeit von 18 Minuten inklusive einer Umsteigezeit von sieben Minuten ergeben. Beide Reisezeiten können tageszeitunabhängig realisiert werden. Ein fahrplanfeiner

Abbildung 23: Ansätze zur Modellierung von IV- und ÖV-Graphen



Quelle: eigene Darstellung

ÖV-Graph würde um 08:30 Uhr eine minimale Reisezeit von 25 Minuten ergeben, da die fahrplanbasierte Umsteigezeit 14 Minuten beträgt. Bei einer Abfahrt um 09:00 Uhr wird diese Reisezeit auf 36 Minuten erhöht. Fahrplanfeine ÖV-Graphen sind mittlerweile Standard bei der Abbildung des öffentlichen Verkehrssystems in Erreichbarkeitsmodellen. Besondere Herausforderungen auf regionaler Ebene sind die Netzaufbereitung und die Widerstandsberechnung (Kawabata & Shen 2006; Owen & Levinson 2015, S. 112).

2.3.2 Der ÖV in Erreichbarkeitsmodellen

Die Nachbildung des öffentlichen Personenverkehrs ist eine der größten Herausforderungen in der Erreichbarkeitsmodellierung. In den nachfolgenden Abschnitten wird ein kurzer Überblick des gegenwärtigen Einsatzes in regionalen Modellen gegeben. Anschließend werden die Besonderheiten und die sich daraus ergebenden Anforderungen im Umgang mit ÖV-Verkehrsgraphen diskutiert.

Kurzüberblick

Zwischen 1977 und 1982 entstand am Österreichischen Institut für Raumplanung (ÖIR) in Wien ein auf realen Fahrplan- und Straßennetzdaten aufbauendes landesweites Erreichbarkeitsmodell (Deußner 1996, S. 2). Aufgrund der umständlichen Widerstandsberechnung und der aufwendigen Aktualisierung wurde es in der ersten Hälfte der 1990er Jahre neu aufgebaut. Ein Großteil der regionalen Erreichbarkeitsmodelle basierte bis in die 2000er Jahre ausschließlich auf dem MIV. Diese Beobachtung steht im Widerspruch zur herausgehobenen Bedeutung des ÖPNV in der Daseinsvorsorge (Bäumer & Reutter 2005; BMVBS 2010b). Die Begrenzung auf den MIV lässt zudem außer Acht, dass gerade exkludierte und sozial benachteiligte Bevölkerungsgruppen auf öffentliche Verkehrsmittel angewiesen sind (Martin *et al.* 2002, S. 6). Die Integration von öffentlichen Verkehrsmitteln wurde in den folgenden Jahren vorangetrieben, um insbesondere die Mobilitätsoptionen dieser Bevölkerungsgruppen abzubilden (Hess 2005; Higgs 2004).

Eine frühe Anwendung im deutschsprachigen Raum erfolgte in Wien unter Verwendung realer Fahrplandaten und hoch aufgelöster Baublöcke (Prinz & Herbst 2008). Bedeutsam sind außerdem der Erreichbarkeitsatlas der Metropolregion München (Büttner *et al.* 2018; Wulforth *et al.* 2010) sowie die Modelle des Landkreises Calw und der Region Stuttgart (Friedrich & Hartl 2015; Friedrich *et al.* 2016). Auf nationaler Ebene sind die Erreichbarkeitsanalysen des BBSR für den MIV und den ÖV etabliert (vgl. Abschnitt 1.4.1).

Auch im Rahmen der MORO-Projekte (Modellvorhaben der Raumordnung) wurden ab 2006 verschiedene multimodale Erreichbarkeitsanalysen durchgeführt. In diesen soll die *»praktische Erprobung und Umsetzung innovativer, raumordnerischer Handlungsansätze und*

Instrumente in Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis [...]« untersucht werden (BBSR o.J.a). Zu diesen Instrumenten gehört auch die Erreichbarkeitsmodellierung. Ein Vergleich von drei Modellierungsansätzen kommt zu dem Ergebnis, dass die Berechnung intermodaler Wege im ÖPNV der einfachen Bestimmung von Luftlinien oder Reisezeiten im MIV vorzuziehen ist (BMVBS 2010c, S. 45ff.). In einer zweiten Phase wurden 21 mitunter mehrere Landkreise umfassende Modellregionen in das Förderprogramm aufgenommen. Erreichbarkeitsanalysen und Bevölkerungsvorausschätzungen sind die zentralen Bausteine für themenspezifische Analysen und Modellrechnungen (BMVI 2016, S. 32). Ein besonderer Fokus liegt auf dem öffentlichen Verkehrsangebot, welches in 19 Untersuchungsregionen einer Erreichbarkeitsanalyse unterzogen wurde. Diese Analysen basieren auf Rastermodellen mit einer Auflösung zwischen 100- und 250-Metern sowie realen Fahrplandaten (Spiekermann & Schwarze 2014, S. 63ff.). In diesen Projekten wurde deutlich, dass der Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen einen Aufwand erzeugt, der gerade in kleinen Regionen den zu erwartenden Nutzen rasch übersteigt. In größeren Regionen überfordert dagegen die hohe Komplexität die zeitlichen und personellen Ressourcen der Planungsträger. Gleichzeitig wird betont, dass die Durchführung von Erreichbarkeitsanalysen als zweckmäßig für die Entwicklung von Regionalstrategien anzusehen ist (BMVI 2016, S. 39).

Besonderheiten

Die Wege im öffentlichen Verkehrssystem unterscheiden sich vom Individualverkehr aufgrund ihrer Intermodalität und insbesondere der Fahrplanbindung. Anders als im Individualverkehr stehen Verbindungsoptionen nur zu bestimmten Zeiten und an bestimmten Orten (Haltestellen) zur Verfügung. Das Routing erfolgt nicht nur auf dem Fußwegnetz, sondern gewissermaßen im Fahrplan (Kujala *et al.* 2018, S. 41). Der Rückgriff auf möglichst aktuelle Fahrplandaten, die besondere Art der Routenberechnung sowie die schwierige räumliche Konkretisierung aufgrund der grundsätzlichen Intermodalität haben die Entwicklung von ÖV-Erreichbarkeitsanalysen maßgeblich geprägt. Nachfolgend sind die Parameter aufgeführt, die die besondere Komplexität des öffentlichen Verkehrs in Erreichbarkeitsmodellen hervorrufen:

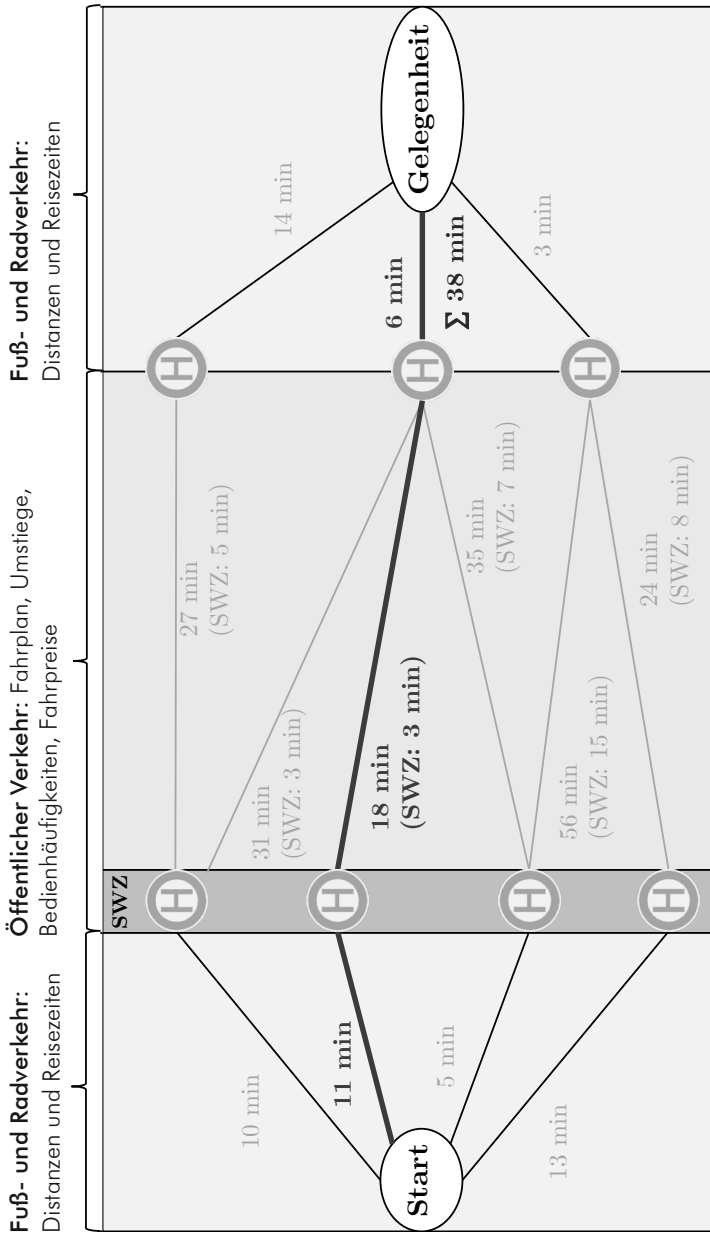
- intermodale Wege (NMIV + ÖV)
- Fahrplanbindung (Uhrzeit, Datum)
- Umstiege und Anschlussgewährung
- Bedienhäufigkeiten
- komplexe Preissysteme
- unterjährige Fahrplanänderungen

In Abbildung 24 ist ein schnellster Weg zwischen einer Raumeinheit und einer Gelegenheit auf einem intermodalen ÖV-Verkehrsgraphen dargestellt. Im Vor- und Nachlauf sind die Raumstrukturen auf dem NMIV-Netz an die Haltestellen angebunden. Die Haltestellen fungieren als Zugangsknoten zum öffentlichen Verkehrssystem. Wenn reale Anbindungszeiten implementiert werden sollen, müssen demnach NMIV-Netzdaten sowie standortscharfe Haltestellen vorliegen.

Das öffentliche Verkehrssystem weist einige weitere Besonderheiten auf, die sich unmittelbar auf die Bewertung von Reisealternativen auswirken. So wird im Unterschied zum Individualverkehr häufig nicht auf reisezeitminimierende Verbindungen zurückgegriffen. Nassir *et al.* (2016, S. 31) haben am Beispiel von Brisbane (AUS) zeigen können, dass 41,0% der Reisen nicht auf der schnellsten und 55,7% der Reisen nicht auf der nutzenmaximierenden Verbindung durchgeführt werden. Sie kommen daher zu dem Schluss, dass nicht alle Nutzer die Raumwiderstände identisch bewerten und abwägen (ebd., S. 27). Entsprechend wird betont, dass die ausschließliche Betrachtung minimaler Reisezeiten im ÖV die grundlegenden Motive der Wahl öffentlicher Verkehrsmittel unbeachtet lässt. Zu diesen gehören unter anderem die Bedienhäufigkeit, nötige Umstiege, Fahrpreise, die Haltestellenausstattung und Zugangsweiten (Chowdhury 2016; Kaplan *et al.* 2014; Nassir *et al.* 2016). Entsprechend müssen den einzelnen Etappen mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln jeweils verschiedene Raumwiderstände zugeordnet werden, die sich nicht immer zu einer Gesamtreisezeit aggregieren lassen. Zu diesen gehören beispielsweise die SWZ, die Fahrtzeit im ÖSPV und die Verspätungsanfälligkeit.

Fransen *et al.* (2015, S. 178) unterscheiden vier Ansätze zur Bewertung von Raumwiderständen im ÖV-System. Der erste Ansatz umfasst lediglich die Zugänglichkeit zum öffentlichen Verkehrssystem

Abbildung 24: Schnellste Wege auf einem intermodalen ÖV-Verkehrsgraphen



Quelle: eigene Darstellung

(vgl. Abschnitte 2.1.3.1 und 2.3.3.5). Dabei werden die Raumwiderstände zwischen den Raumstrukturen und den Haltestellen auf Basis von Luftlinien oder Realdistanzen bestimmt. Das zweite Verfahren beruht auf der Abfahrtsfrequenz an den Haltestellen und macht somit die Bereitstellung von Fahrplandaten erforderlich (Bok & Kwon 2016). Drittens können die unter 2.3.1 dargestellten einfachen ÖV-Graphen der Berechnung von Raumwiderständen zwischen den Raumstrukturen dienen. Jedoch ermöglicht nur das fahrplanfeine Modellierungsverfahren als vierte Variante die Berechnung sämtlicher Raumwiderstände in einem intermodalen ÖV-Verkehrsgraphen. In diesem Zusammenhang stellen die Integration des Tarifsystems und die Berechnung der Bedienungsfrequenz die größten Herausforderungen dar.

Doch selbst wenn es möglich ist, die genannten Raumwiderstände für alle ÖV-Wege zu berechnen, bleibt ihre Aggregation in nutzbare Erreichbarkeitsindikatoren ungeklärt. Zwar wurden bereits unterschiedliche Regressionsmodelle entwickelt, um die Bedeutung der einzelnen Faktoren zu bestimmen, jedoch blieb ein Transfer dieser Werte in handhabbare Erreichbarkeitsindikatoren bisher aus (Anderson *et al.* 2017; Kaplan *et al.* 2014; Nassir *et al.* 2016). Die Lösung ist weiterhin die separate Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren auf Basis der einzelnen Raumwiderstände (vgl. Abschnitte 2.3.3.5 und 3.6).

2.3.3 Aufbau und Einsatz von Verkehrsgraphen des ÖV

Sowohl auf internationaler als auch auf nationaler Ebene zeigen verschiedene Untersuchungen, dass gerade bei der Integration des öffentlichen Verkehrs in Erreichbarkeitsanalysen ein erheblicher Handlungsbedarf besteht (vgl. Abschnitt 1.4). Da in dieser Arbeit unterschiedliche Detaillierungsansätze anhand eines regionalen Modells verglichen werden, stellt sich die Frage, welche Modellierungsverfahren bereits etabliert sind.

2.3.3.1 Aufbau der Literaturanalyse

Die Analyse des aktuellen Forschungsstandes hinsichtlich der Integration öffentlicher Verkehrsmittel in Erreichbarkeitsmodelle basiert auf 44 wissenschaftlichen Publikationen (vgl. Anhang 7). Das Sampling

umfasst ausschließlich Untersuchungen mit einem regionalen Fokus im In- und Ausland. Die Untersuchungen verfolgen unterschiedliche Untersuchungsinteressen, beispielsweise die Gerechtigkeit im Verkehr (Farber *et al.* 2014; Kaplan *et al.* 2014; Karner 2018), die Gesundheitsversorgung (Martin *et al.* 2002; Wieland & Dittrich 2016) oder die einfache Erreichbarkeitsdarstellung (Anderson *et al.* 2013; BBSR o.J.b; Beria *et al.* 2017). Andere Arbeiten fokussieren auf die methodische Weiterentwicklung von ÖV-Erreichbarkeitsuntersuchungen hinsichtlich der Menge zu berücksichtigender Haltestellen (Djurhuus *et al.* 2016) oder der Modellierung und Bewertung von Raumwiderständen (Kujala *et al.* 2018; Salonen & Toivonen 2013).

Die Stichprobe beinhaltet nur seit dem Jahr 2000 veröffentlichte Arbeiten, da sich ältere Ansätze nicht bewährten oder in diesen Arbeiten adaptiert werden. Ohnehin ist ein Großteil der regionalen Erreichbarkeitsmodelle erst in den letzten zehn Jahren entstanden. In der Stichprobe sind nur Arbeiten enthalten, die auf eigenen Erreichbarkeitsmodellen aufbauen. Bei der Erstellung des Samplings wurde auf das sogenannte Snowballing zurückgegriffen, also eine Stichprobenzusammensetzung über häufig zitierte Forschungsartikel (Wee & Banister 2016, S. 284). Insgesamt entfallen 19 Arbeiten auf den europäischen und 17 auf den nordamerikanischen Raum. Fünf dieser Untersuchungen stammen aus Deutschland und zwei weitere aus Österreich. Hinzu kommen fünf Arbeiten aus weiteren Regionen, etwa aus Israel oder der Türkei. Drei Arbeiten können keiner einzelnen Region zugeordnet werden (Bok & Kwon 2016; Chowdhury *et al.* 2014; Curtis & Scheurer 2010). Die ausgewählten Arbeiten werden hinsichtlich der folgenden Modellparameter untersucht und vergleichend dargestellt (vgl. Abschnitte 2.3.1 und 2.3.2):

- Gebietsgröße und die räumliche Auflösung
- Detaillierung der Wege
- Raumwiderstände
- Fahrplandaten und Softwarenutzung
- Erreichbarkeitsindikatoren

In den folgenden Abschnitten wird der Umgang mit diesen Modellparametern in den einzelnen Arbeiten näher vorgestellt und die Entwicklung der letzten Jahre nachgezeichnet. Es sollen insbesondere Erkenntnisse

für den Aufbau eines regionalen und multimodalen Erreichbarkeitsmodells gewonnen werden (vgl. Kapitel 3).

2.3.3.2 Gebietsgröße und räumliche Auflösung

Einen besonderen Einfluss auf die Rechenzeit und den Speicherbedarf haben die Gebietsgröße und die räumliche Auflösung. In Tabelle 7 sind die verwendeten Raumbezugssysteme und die Gesamtzahl der in den einzelnen Untersuchungen berücksichtigten Raumeinheiten aufgeführt. In drei Arbeiten wurde keine Gesamtzahl der Raumeinheiten ausgewiesen (Lei & Church 2010; O'Sullivan *et al.* 2000; Wulfhorst *et al.* 2010). Von den 41 identifizierten Raumbezugssystemen basieren 22 auf Verkehrszellen oder administrativen Gebieten. Es handelt sich also um unregelmäßige Vektormodelle, die große Aggregationsfehler erzeugen können (vgl. Abschnitt 2.2). Auf diese Raumeinteilung wird jedoch häufig aufgrund der einfachen Datenbeschaffung und der relativ geringen Menge der Raumeinheiten zurückgegriffen. Anzumerken ist außerdem, dass sich die verwendeten Verkehrszellen in der Regel an administrativen Grenzen orientieren. In den USA ist der Rückgriff auf die hierarchisch aufgebaute Gebietseinteilung der alle zehn Jahre durchgeführten Volkszählung üblich. Diese umfasst in der geringsten Auflösung Zensusblöcke mit rund 30 Einwohnern und garantiert eine hohe Kleinräumigkeit (Farber *et al.* 2014, S. 151). Die meisten Untersuchungen basieren jedoch auf census block groups, die jeweils etwa 40 Zensusblöcke beinhalten (Farber & Fu 2017; Owen & Levinson 2015).

Von allen Raumbezugssystemen beruhen neun auf hochaufgelösten oder zumindest regelmäßigen Raumeinteilungen in Form von Rasterzellen oder Gebäuden. Aufgrund der hohen Auflösung und des regionalen Anwendungsfokus enthalten einige dieser Raumbezugssysteme mehr als 100 Tsd. Raumeinheiten (Benenson *et al.* 2017b; Martin *et al.* 2002; Mavoia *et al.* 2012). Das umfänglichste Modell beinhaltet für ganz Österreich etwa 570 Tsd. bewohnte 100-Meter-Zellen (ÖROK 2018; Weiss *et al.* 2018). Ungeachtet dieser Einzelfälle bilden hochaufgelöste ÖV-Erreichbarkeitsmodelle in regionalen Kontexten noch die absolute Ausnahme.

Einzelne Analysen wurden zudem nicht flächenhaft, sondern nur für Haltestellen oder Knoten durchgeführt (Fayyaz & Liu 2016; Fortin

et al. 2016). Dies hat die prinzipielle Vereinfachung der Berechnung zum Vorteil, da auf die Verknüpfung von ÖV-System und Raumstruktur verzichtet werden kann (vgl. Abschnitt 2.3.3.3). Außerdem beinhaltet das Sampling zwei Arbeiten mit nur wenigen Startpunkten aber detaillierten Wegen und komplexen Erreichbarkeitsindikatoren (Chowdhury *et al.* 2014; Liao & van Wee 2017). Da die Anzahl der Raumeinheiten nicht allein über die Komplexität eines Erreichbarkeitsmodells entscheidet, ist weiterhin zu untersuchen, ob diese mit den verwendeten Indikatoren und der Detaillierung der Wege korrespondiert.

2.3.3.3 Detaillierung von Wegen

Beim Aufbau von ÖV-Verkehrsgraphen ist zwischen dem Modellierungsansatz, dem Umgang mit der Haltestellenanbindung sowie der SWZ zu unterscheiden.

Tabelle 7: Gebietseinteilungen und Menge der Raumeinheiten

Gebietseinteilung	Häufigkeit
Verkehrszellen / Admin. Gebiete ≤ 500	10
Verkehrszellen / Admin. Gebiete > 500 und ≤ 2.500	8
Verkehrszellen / Admin. Gebiete ≥ 2.500 (bis ~ 11 Tsd.)	4
Rasterzellen / Gebäude ≤ 10 Tsd.	3
Rasterzellen / Gebäude > 10 Tsd. und ≤ 100 Tsd.	3
Rasterzellen / Gebäude > 100 Tsd. (bis ~ 570 Tsd.)	4
Haltestellen / Knoten ≤ 500	3
Haltestellen / Knoten > 500 und ≤ 5 Tsd.	2
Haltestellen / Knoten > 5 Tsd. (bis ~ 40 Tsd.)	2
wenige Punkte (< 100)	2
unklar	3
Σ	44

Quelle: eigene Darstellung

Modellansatz

Grundsätzlich ist zwischen einfachen und fahrplanfeinen ÖV-Graphen zu unterscheiden (vgl. Abbildung 23). Sechs Modellansätze basieren auf Raumwiderständen, die auf einem einfachen und nicht fahrplanbasierten ÖV-Graphen ermittelt wurden (vgl. Tabelle 8). Gerade in frühen Arbeiten sind solche, auf mittleren Fahrtzeiten oder Geschwindigkeiten entlang von Linienverläufen basierende Ansätze üblich (O’Sullivan *et al.* 2000; Hess 2005; Martin *et al.* 2002). Auch Mavoa *et al.* (2012) verwenden einen einfachen ÖV-Graphen, allerdings bei einer hohen räumlichen Auflösung mit 371 Tsd. Wohnblöcken und 17 Gelegenheitstypen. Eine Besonderheit sind die Erreichbarkeitsindikatoren von SNAMUTS (Spatial Network Analysis for Multimodal Urban Transport Systems), welche bisher auf weltweit 25 Städte angewendet wurden (Curtis & Scheurer 2010; Curtis & Scheurer 2017). Diese Kennwerte dienen der Bewertung von ÖV-Systemen auf einer regionalen Ebene. Das Modell beinhaltet eine vereinfachte Netztopologie und die damit einhergehende Reduzierung von Linienverläufen, Haltestellen und Fahrplanfahrten. Diese Vereinfachungen machen indes umfangreiche händische Nachbearbeitungen notwendig, reduzieren aber gleichzeitig die Rechenzeiten.

Um die unterschiedlichen Angebotsqualitäten des ÖPNV im Tagesverlauf zu bewerten und seine Verbindungsfunktionen zu untersuchen, ist die Verwendung fahrplanfeiner ÖV-Graphen unabdingbar. 35 Modellansätze enthalten eine solche Fahrplanbindung. Einer der ersten Ansätze auf regionaler Ebene stammt von Martin *et al.* (2008) und dient der

Tabelle 8: Modellansätze bei der Detaillierung von Wegen

Ansatz	Tür-zu-Tür	Haltestellen	Σ
einfacher ÖV-Graph	4	2	6
fahrplanfeiner ÖV-Graph			
SWZ = ohne oder konstant	17	10	27
SWZ = halber Takt	5		5
SWZ = Erwartungswert (real)	2	1	3
Aktivitätenketten	1		1
kein Routing	/	2	2
Σ	29	15	44

Quelle: eigene Darstellung

Berechnung von Reisezeiten und möglichen Rückfahrten zwischen Postleitzahlgebieten und Krankenhäusern. Die Raumwiderstände wurden indes nur zwischen den Haltestellen und ohne Einbeziehung der Raumstrukturen und Anbindungen berechnet. Ein frühes Modell mit einem fahrplanfeinen und intermodalen ÖV-Verkehrsgraphen (Tür-zu-Tür-Ansatz) wurde für die Stadt Wien entwickelt (Prinz & Herbst 2008). Auf diesem Graphen erfolgte die Berechnung schnellster Wege zwischen mehr als 10 Tsd. Baublöcken und einzelnen innerstädtischen Zentren unter Einbeziehung der fußläufigen Haltestellenanbindung und der SWZ (halber Takt). Seit etwa 2015 ist es auch im regionalen Kontext üblich, das öffentliche Verkehrssystem mit Hilfe von Fahrplandaten in Erreichbarkeitsmodelle zu integrieren. Vereinfachungen werden jedoch weiterhin bei der Berechnung der SWZ oder der Haltestellenanbindung vorgenommen.

Zwei Untersuchungen der ÖV-Erreichbarkeit basieren ausschließlich auf der Erschließungs- und Bedienungsfunktion und verwenden somit keinen routingfähigen ÖV-Graphen (Bok & Kwon 2016; Chen *et al.* 2016). Die Erschließungsfunktion wird über die system accessibility abgebildet und repräsentiert die räumliche Verteilung und den Zugang zum Haltestellennetz. Die Bedienungsfunktion umfasst unter anderem die Anzahl der Haltestellenabfahrten und die Anzahl unterschiedlicher Linien. Da für ihre Bestimmung keine Routenberechnung nötig ist, reduziert sich der Bearbeitungsaufwand erheblich (vgl. Abschnitt 2.1.3.1). Ein weiterer Forschungszweig widmet sich den personenbasierten Erreichbarkeitsindikatoren und der Abbildung inter- und multimodaler Aktivitätsketten (Arentze & Timmermans 2004; Liao *et al.* 2013b). Bisher existieren jedoch nur wenige Ansätze, die eine flächenhafte Berechnung solcher Erreichbarkeitsindikatoren ermöglichen. Am Beispiel des Korridors Hague-Rotterdam-Dordrecht (NL) wurde zwar gezeigt, dass die Routenfindung in regionalen Netzen prinzipiell möglich ist, eine kleinräumige Berechnung gelang bisher aber nicht (Liao & van Wee 2017).

Intermodalität des Verkehrsgraphen

In 11 der 44 untersuchten Arbeiten erfolgt die Widerstandsberechnung ausschließlich zwischen Haltestellen und ohne Berücksichtigung fußläufiger Haltestellenanbindungen. Dieser Ansatz reduziert die

Modellkomplexität erheblich, da kein zusätzliches Fußwegenetz aufzubauen ist. Solche auf Haltestellenmatrizen basierende Erreichbarkeitsmodelle kommen beispielsweise zum Einsatz, um die einzelnen Qualitätsmerkmale von ÖV-Systemen (Reisezeiten, Reisekosten, Umstiege, Takt etc.) zu bewerten.

Eine hohe räumliche Auflösung dient der Berechnung von Erreichbarkeiten auf individueller Ebene. Für die Umsetzung ist die Nachbildung intermodaler Wege von Tür-zu-Tür unabdingbar. Diese erfordert zum Beispiel die Anbindung der Raumeinheiten an die Haltestellen auf einem realen Fuß- und Radwegenetz. 29 Untersuchungen setzen auf die intermodale Routenberechnung von Tür-zu-Tür. Daher kommt dieses Verfahren zumeist in Untersuchungsräumen mit wenigen Raumeinheiten zum Einsatz (vgl. Tabelle 9). Vier dieser Arbeiten basieren jedoch auf einfachen ÖV-Graphen und ermöglichen insofern nicht die korrekte Ausgabe der ÖV-Reisezeit (Hess 2005; Krizek *et al.* 2007; Mavoia *et al.* 2012; O’Sullivan *et al.* 2000). In einer der ersten auf intermodalen Wegen basierenden Erreichbarkeitsuntersuchungen wurden Reisezeitsynchronen für unterschiedliche Standorte in der Region Glasgow (UK) berechnet (O’Sullivan *et al.* 2000). Berücksichtigt wurden die fußläufige Haltestellenanbindung und die SWZ. Bestehende Limitierungen beim Netzaufbau führten jedoch dazu, dass das Busangebot in Durchschnittsgeschwindigkeiten auf Linienabschnitten übersetzt und analog zum MIV geroutet wurde (ebd., S. 96, 97). In einer im Jahr 2005 veröffentlichten Untersuchung wurde dieser Ansatz zur Berechnung von Kumulationsindikatoren für etwa eintausend Zensusblöcke eingesetzt (Hess 2005). Die Arbeit kam zu dem Ergebnis, dass Jobs im Niedriglohnbereich und Haushalte mit geringem Einkommen eine ähnliche räumliche Verteilung aufweisen und folglich keine bedeutsame Exklusion festzustellen ist (ebd., S. 1193ff.).

In aktuellen Erreichbarkeitsmodellen ist es üblich, auch in großen Untersuchungsräumen die Raumwiderstände von Tür-zu-Tür unter Berücksichtigung von Fahrplandaten und hochaufgelösten Raumbezugsystemen zu berechnen. Zu diesen gehören regionale Modelle mit über 100 Tsd. Raumeinheiten (Benenson *et al.* 2017b) aber auch landesweite Ansätze mit rund 570 Tsd. Rasterzellen (ÖROK 2018; Weiss *et al.* 2018). In Modellen mit mehr als 10 Tsd. Raumeinheiten werden jedoch zumeist

Reiseaufwandsindikatoren berechnet, die, im Vergleich zu Kumulationsindikatoren, kürzere Rechenzeiten aufweisen und weniger Standortdaten benötigen (Farber *et al.* 2014; ÖROK 2018; Spiekermann & Schwarze 2014). Hingegen bilden Modelle mit mehr als 100 Tsd. Raumeinheiten sowie fahrplanfeinen und intermodalen ÖV-Graphen zur Berechnung von Kumulations- und Potenzialindikatoren bisher noch die Ausnahme.

Tabelle 9: Modellierung intermodaler Wege nach Anzahl der Raumeinheiten

Raumeinheiten	Häufigkeit
<= 1 Tsd.	12
> 1 Tsd. und <= 10 Tsd.	11
> 10 Tsd. und <= 100 Tsd.	3
> 100 Tsd.	3
monomodal	15
Σ	44

Quelle: eigene Darstellung

Raumwiderstände

Beim Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen stellt sich zwangsläufig die Frage, welche Raumwiderstände zu berechnen sind. Die Festlegung beeinflusst den Modellaufbau, den Datenbedarf und die zu nutzende Software (vgl. Abschnitt 2.3.3.4). Die wesentlichen Raumwiderstände des öffentlichen Verkehrs sind die Reisezeit, die Reisekosten, die SWZ, die Umsteige- und Bedienhäufigkeit sowie die Zugangs- und Abgangsweite. Im Individualverkehr kann hingegen die Reiseweite oder die Reisezeit als alleiniges Kriterium bei der Routensuche dienen. Da die Reiseweite im ÖV keine unmittelbare Bedeutung besitzt, ist zumeist allein die Gesamt-reisezeit der entscheidende Widerstandsparameter. Da die Reisezeiten im Tagesverlauf jedoch erheblich schwanken, ist zu hinterfragen, ob die minimale Reisezeit in einem Zeitfenster tatsächlich ausreichend ist, um die Qualität des ÖV-Angebots hinreichend genau abzubilden. Gerade Schwachlastzeiten schwanken die kürzesten Reisezeiten erheblich. Dies bedeutet auch, dass die berechneten Reisezeiten in einem Zeitfenster von den tatsächlich realisierbaren zu einem bestimmten Zeitpunkt erheblich abweichen (Stępnia *et al.* 2019, S. 18).

Eine immer höhere Performance und die Weiterentwicklung von Routingalgorithmen führten ab etwa 2014 zu einer differenzierten Bewertung des ÖPNV-Angebotes im Tagesverlauf (Geurs *et al.* 2015, S. 83). Zu dieser gehört beispielsweise die Ermittlung Paretooptimaler Verbindungen zwischen Haltestellen am Beispiel des Großraumes Helsinki (Kujala *et al.* 2018). Eine Verbindung stellt dann das Pareto-Optimum dar, wenn es nicht möglich ist, auf eine andere Verbindung auszuweichen, ohne ein Qualitätsmerkmal zu verschlechtern. Entsprechend kann sowohl eine Minimierung der Reisezeit, der Umstiege aber auch der SWZ zu eigenen Paretooptimalen Relationen führen. Kujala *et al.* (ebd., S. 52) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass der Reisekontext (geplant vs. spontan) einen erheblichen Einfluss auf die SWZ und damit die Gesamtreisezeit aufweist. Da die Raumwiderstände für unterschiedliche Zeitpunkte ermittelt werden müssen, ist die Rechenzeit ein wesentliches Hindernis (ebd., S. 52). Die ermittelten Paretooptimalen Verbindungen weisen sehr uneinheitliche Reisezeiten auf, was die Bedeutung der einzelnen Qualitätsmerkmale in der ÖV-Erreichbarkeitsberechnung unterstreicht. Die Auswertungen machen zudem deutlich, dass ein Großteil dieser Kriterien nur unter Berücksichtigung fahrplanfeiner und intermodaler ÖV-Graphen zu ermitteln ist.

Tageszeitliche Schwankungen im ÖV-Angebot können auch über gemittelte Reisezeiten für unterschiedliche Abfahrtszeiten berücksichtigt werden. Beispiele sind die Berechnung der mittleren Reisezeit in zweistündigen fünf-Minuten-Intervallen (24 Abfahrtszeiten) (Karner 2018, S. 26) oder der minimalen Reisezeit in ganztägigen fünf-Minuten-Intervallen (1.440 Abfahrtszeiten) (Farber *et al.* 2016). Laut diesen Auswertungen ist das ÖV-Angebot bei einer hohen Nachfrage durch sozial benachteiligte Gruppen besonders lückenhaft (ebd., S. 47). Aufgrund der Vielzahl an Routings werden über den gesamten Tag berechnete Erreichbarkeitspotenziale auch als die »umfänglichsten ÖV-Indikatoren« bezeichnet (Fayyaz & Liu 2016, S. 2). Da der Rechenaufwand¹⁸ mit der Anzahl der Haltestellen im Quadrat zunimmt, sind solche Analysen bisher auf kleine Untersuchungsräume mit 134 Haltestellen (ebd., S. 4) oder 1.326 Zensuszellen (Farber *et al.* 2016, S. 41) beschränkt. Ein möglicher

18 Rechenaufwand = Anzahl Haltestellen* Suchdurchläufe (Fayyaz & Liu 2016, S.5)

Kompromiss ist die Berechnung von minimalen Reisezeit-Quantilen in einem Zeitintervall (vgl. Abschnitt 3.5.1).

Die Berechnung empfundener Reisezeiten hat hingegen zum Ziel, eine vergleichbare Größe für Wege mit den einzelnen Verkehrsmodi zu generieren und die einzelnen Angebotsqualitäten adäquat zu berücksichtigen (Koopmans *et al.* 2013; Nassir *et al.* 2016). Bei der empfundenen Reisezeit handelt es sich um generalisierte Kosten, also die Übersetzung von Reisezeiten, Umstiegen, Bedienhäufigkeiten und Fahrpreisen in eine gemeinsame und dimensionslose Messgröße. Von der FGSV wird die Bestrafung von Umstiegen mit drei Minuten in Städten und mit 10 Minuten in den übrigen Gebieten vorgeschlagen (FGSV 2008, S. 46). Eine Untersuchung am Beispiel von Kopenhagen kam zu dem Ergebnis, dass eine Minute Fahrtzeit im Bus als unattraktiver wahrgenommen wird, als eine Minute Fahrtzeit in U- und S-Bahn (Anderson *et al.* 2017, S. 240). Zudem sind lange Zu- und Abgangswege sowie lange Wege bei Umstiegen zu vermeiden (ebd., S. 240).

Obwohl die Fahrpreise ein wesentliches Angebotsmerkmal des öffentlichen Verkehrs darstellen, ist ihre Berechnung bisher die Ausnahme. Zu diesen gehört die Verwendung einer vom Verkehrsamt gelieferten Kostenmatrix zwischen allen Haltestellen in der Metropolregion Montreal (El-Geneidy *et al.* 2016, S. 305). Auf Kostenmatrizen muss zurückgegriffen werden, da Ticketsysteme in der Regel nicht ohne großen Aufwand in die Struktur bestehender ÖV-Graphen einzubinden sind. So können sich Ring-, Zonen- und Streckentarife überlagern, was die Kostenberechnung auf üblichen ÖV-Graphen deutlich erschwert. Zukünftig muss insbesondere die Bereitstellung von Kostenangaben durch die Verkehrsunternehmen oder Verkehrsverbünde verbessert werden, da gerade die Bewertung sozialer Exklusion und räumlicher Segregation nicht ohne die Fahrpreisberechnung auskommt.

Haltestellenanbindung

Der Anbindung der ÖV-Haltestellen an die Raumeinheiten und Gelegenheiten kommt in regionalen Modellen eine große Bedeutung zu, da die Anbindung zumeist fußläufig erfolgt. Dies bedeutet auch, dass in den ÖV-Verkehrsgraphen sowohl Fahrplandaten als auch Daten des Wegenetzes integriert werden müssen, um intermodale Wege abzubilden.

Grundsätzlich lassen sich drei Herangehensweisen identifizieren, die sich hinsichtlich ihrer Genauigkeit und ihres Aufwandes unterscheiden.

Erstens ist es möglich, auf eine gesonderte Anbindung zu verzichten und konstante Zeitaufschläge zu verwenden. Gerade in großflächigen Erreichbarkeitsmodellen mit entsprechend zahlreichen Raumeinheiten kommt dieser Ansatz zur Anwendung (Anderson *et al.* 2013; BBSR o.J.b; Martin *et al.* 2002). Um die Anbindung adäquat abzubilden und dennoch auf einen intermodalen Verkehrsgraphen zu verzichten, hat sich als zweite Möglichkeit die Anbindung über Luftliniendistanzen etabliert. Obwohl die Art der Anbindung in den einzelnen Forschungsarbeiten nicht immer präzisiert wurde, konnten sieben Arbeiten mit einem einfachen und auf Luftlinien basierenden Haltestellenzugang identifiziert werden (Benenson *et al.* 2017b; Fayyaz *et al.* 2017; Kaplan *et al.* 2014; Wulforth *et al.* 2010). Werden Luftliniendistanzen zu nächstgelegenen Haltestellen ermittelt, müssen diese in Reisezeiten umgewandelt werden. Die FGSV empfiehlt einen Umwegfaktor von 1,2 und eine Gehgeschwindigkeit von 4,2 km/h (FGSV 2010, S. 7). Der Umwegfaktor entspricht der mittleren vermuteten Abweichung der Realdistanz von der Luftlinienweite (vgl. Abschnitt 5.3.1).

Im dritten Verfahren erfolgt schließlich die Anbindungsberechnung auf einem IV-Verkehrsgraphen. In neueren Modellen mit teilweise mehreren 10 Tsd. Zellen wird dieses Verfahren bereits eingesetzt (ÖROK 2018; Spiekermann & Schwarze 2014; Schwarze 2015). Die Reisezeit hängt dann von der Modellierung des Verkehrsgraphen im Individualverkehr ab (vgl. Abschnitte 3.5.2 und 3.5.3). Zumeist werden Kanten aus OSM verwendet und diese mit einem Geschwindigkeitsniveau zwischen 4 und 5 km/h gewichtet (vgl. Tabelle 17). In Abschnitt 5.1.2 wird untersucht, welchen Einfluss eine geringere Detaillierung auf die Genauigkeit tatsächlich hat und inwiefern diese Genauigkeit von der räumlichen Auflösung abhängt.

Neben der Art der Haltestellenanbindung ist außerdem die Anzahl der angebundenen Haltestellen bei der Berechnung von Raumwiderständen relevant. Zwar wird in den untersuchten Arbeiten in der Regel nicht auf die Menge der angebundenen Haltestellen eingegangen, gleichwohl haben Djurhuus *et al.* (2016) gezeigt, dass sie die minimalen Reisezeiten wesentlich beeinflusst. So vergrößert sich das von einem Standort in 30 oder 60 Minuten erreichbare Gebiet um rund 35%, wenn nicht nur die

nächste Haltestelle, sondern alle Haltestellen im Umkreis von einem Kilometer angebunden werden und somit als mögliche Starthaltestelle dienen (ebd., S. 13).

Startwartezeit

Eine besondere Bedeutung besitzt die Taktfolgezeit bzw. die Bedienhäufigkeit¹⁹, da von dieser die zu erwartende Wartezeit an der Starthaltestelle abhängt (SWZ). Diese bemisst sich über den Takt, die Fahrplankenntnis sowie die Risikobereitschaft, die Fahrt zugunsten einer minimierten Wartezeit zu verpassen (Kujala *et al.* 2018, S. 42).

Am Beispiel von Helsinki wurden die SWZ und die Reisezeit für spontane und geplante Wege berechnet. Spontane Wege zeichnen sich dadurch aus, dass eine Optimierung der SWZ nur sehr begrenzt möglich ist. Kujala *et al.* haben gezeigt, dass die Variation der Reisezeit mit der Reisedauer zunimmt und die Spontanität eine große Rolle spielt. Entsprechend hoch ist die Bedeutung der SWZ gerade auf langen Reisen. Je spontaner eine Reise, desto länger die SWZ und damit die Gesamtreisezeit (ebd., S. 53). Um die mittlere SWZ auf einer bestimmten Verbindung zu berechnen, wird ein fahrplanfeiner ÖV-Graph benötigt. Auch ein linienfeiner ÖV-Graph kann verwendet werden, um eine vereinfachte Variante der SWZ zu berechnen (vgl. Abschnitt 2.3.1). Da insbesondere die Erstellung fahrplanfeiner ÖV-Graphen im Aufbau regionaler Erreichbarkeitsmodelle eine große Herausforderung darstellt, kommt der SWZ eine zentrale Bedeutung zu.

Drei Möglichkeiten des Umgangs mit der SWZ sind zu unterscheiden. Erstens kann sie als ein pauschaler Reisezeitaufschlag nachgebildet werden. Insgesamt 75% der untersuchten Arbeiten verwenden konstante Zeitaufschläge zur Modellierung der SWZ (inkl. Aufschlag = 0) (vgl. Tabelle 8). Dies betrifft Modelle mit zahlreichen (BBSR o.J.b; Djurhuus *et al.* 2016; Farber *et al.* 2014) oder auch mit wenigen Raumeinheiten (El-Geneidy *et al.* 2016; Fransen *et al.* 2015; Lee & Miller 2018).

19 Die Taktfolgezeit ist nur dann relevant, wenn ein >echter< Taktverkehr besteht. Im ländlichen Raum sind in der Regel lediglich Einzelfahrten vorhanden. Dann ist die Bedienhäufigkeit bzw. die Anzahl an Fahrten innerhalb eines Zeitfensters der bestimmende Parameter.

Im zweiten Ansatz wird die SWZ in Relation zur Taktfolgezeit der genutzten Linie an der Starthaltestelle gesetzt. Es wird also davon ausgegangen, dass der Takt an der Starthaltestelle dem Takt auf der gesamten Verbindung entspricht. Jedoch kann gerade auf Umsteigeverbindungen die Fahrtenhäufigkeit an der Starthaltestelle erheblich von der Bedienungshäufigkeit auf der Gesamtroute abweichen. Wird von einer Linie mit einem 10-Minuten-Takt in eine Linie mit einem Stundentakt umgestiegen, weist auch die Gesamtstrecke nur eine stündliche Verbindungsoption auf. Entscheidend für die Bestimmung der Bedienungshäufigkeit ist die Menge eigenständiger Verbindungen im Zeitintervall. Eine Verbindung zwischen Start und Ziel ist dann eigenständig, wenn zu einer gegebenen Abfahrtszeit keine frühere Ankunftszeit über eine andere Verbindung realisiert werden könnte (PTV AG 2018). Eigenständige Verbindungen bilden also immer eine Paretooptimale Kombination aus Start- und Reisezeit (Kujala *et al.* 2018, S. 45).

In Tabelle 10 sind die Abfahrts- und Ankunftszeit sowie die Fahrtzeit auf einer fiktiven Start-Ziel-Relation dargestellt. Die Verbindungen 2 bis 4 sind eigenständig, da es jeweils keine Verbindung gibt, die eine Verbesserung aller Kriterien ermöglicht. Lediglich Verbindung 1 ist nicht eigenständig, da eine frühere Ankunftszeit bei gleicher Startzeit über Verbindung 2 realisiert werden kann. Dem Ansatz eigenständiger Verbindungen folgend, wird der SWZ im dritten Ansatz die Fahrtenhäufigkeit im gesamten Routenverlauf zugrunde gelegt. Da der ArcGIS NA und der OTP (O-penTripPlanner) nicht in der Lage sind diese Information mit einer hohen Performance zu generieren, bleibt diese Möglichkeit auf regionaler Ebene zumeist verwehrt (vgl. Abschnitt 2.3.3.4). Ob die Berechnung der SWZ über die Taktfolgezeit an der Starthaltestelle oder über die Bedienungshäufigkeit auf der ganzen Verbindung ermittelt wird, ist in den untersuchten Arbeiten zumeist nicht näher ausgeführt. Ungeachtet dessen sind Möglichkeiten zur Ableitung der Taktfolgezeit in die SWZ zu identifizieren. Zumeist entspricht die SWZ der halben Taktfolgezeit (Hess 2005; O'Sullivan *et al.* 2000; Prinz & Herbst 2008). Diese Festlegung geht von einer fehlenden Fahrplanorientierung aus. Bei einem 15-Minuten-Takt ist diese Annahme zumeist gültig, bei einem geringeren Takt führt die Orientierung am Fahrplan jedoch dazu, dass zumindest besonders lange Wartezeiten minimiert werden und die

Annahme einer halben Taktfolgezeit die tatsächliche SWZ überschätzt. Um diese Fahrplanorientierung zu berücksichtigen, schlägt die FGSV (2008, S. 48) einen anderen Zusammenhang zwischen der mittleren Taktfolgezeit und der SWZ vor (vgl. Gleichung 3). Dabei liegt die SWZ in Abhängigkeit von der SWZ mitunter deutlich unterhalb der mittleren Taktfolgezeit.

Tabelle 10: Bestimmung eigenständiger Verbindungen
kursiv = eigenständige Verbindung

Verbindung	Abfahrt	Ankunft	Fahrtzeit
1	07:00	07:40	40
2	07:00	07:30	30
3	07:15	07:55	40
4	07:20	08:30	70

Quelle: eigene Darstellung

Die Analysen zeigen, dass die SWZ als unvermeidbarer Bestandteil auf Wegen im öffentlichen Verkehrssystem bisher gar nicht oder nur sehr vereinfacht bei der Berechnung von Raumwiderständen berücksichtigt wird. Und dies obwohl sie einen Anteil von deutlich über 10% an der Gesamtreisezeit aufweisen kann (Boarnet *et al.* 2017; Salonen & Toivonen 2013).

2.3.3.4 Fahrplandaten und Softwareeinsatz

Die Verwendung eines fahrplanfeinen ÖV-Verkehrsrgraphen erzeugt einen hohen Datenbedarf und den Einsatz spezieller Routingsoftware. Zwar konnte in den vergangenen Jahren eine Entwicklung zu kostenfreien Daten und Routingverfahren beobachtet werden, dennoch bleibt der Umgang mit Fahrplandaten eine große Herausforderung in regionalen Erreichbarkeitsmodellen.

Fahrplandaten

In den Fahrplandaten sind unter anderem Informationen zu den einzelnen Fahrplanfahrten (Fahrplanzeiten, Haltefolge etc.) und die Haltestellenstandorte enthalten. Die Literaturanalyse hat gezeigt, dass die Verwendung fahrplanfeiner ÖV-Verkehrsrgraphen bereits als Standard in der Erreichbarkeitsmodellierung anzusehen ist (vgl. Abschnitt

2.3.3.3). Dies bedeutet aber nicht, dass Fahrplaninformationen immer uneingeschränkt zur Verfügung stehen. Zwar kann in der Regel nicht davon ausgegangen werden, dass »Fahrplaninformationen datenschutzrechtlich geschützte personenbezogene Daten oder Betriebsgeheimnisse beinhalten«, gleichwohl ist ihre räumliche Abdeckung in Deutschland noch unzureichend (BBSR 2019, S. 74). Im September 2018 stellten 16 Verkehrsverbände und Verkehrsunternehmen die Soll-Fahrplandaten in ihrem Bedienegebiet zur freien Verfügung (ebd., S. 75). Weitere Verkehrsverbände haben diesen Schritt bereits angekündigt. Da aber nicht das gesamte Bundesgebiet von Verkehrsverbänden abgedeckt wird, bleiben Lücken auch weiterhin bestehen. Des Weiteren führt die Zuständigkeit unterschiedlicher Verbände dazu, dass Fahrplandaten aus unterschiedlichen Quellen zusammengeführt werden müssen, wenn es der Zuschnitt des Untersuchungsgebietes erfordert. Daraus ergeben sich umfangreiche Nachbearbeitungsbedarfe, etwa hinsichtlich der Haltestellennummerierung oder der Eliminierung doppelter Fahrplanfahrten (Spiekermann & Schwarze 2014, S. 65). Es ist also kein Zufall, dass ÖV-Verkehrsgraphen nahezu ausschließlich für Gebiete erstellt werden, die über einen einheitlichen Fahrplandatenbestand verfügen (Friedrich *et al.* 2016; Wulforth *et al.* 2010).

Ein weiteres Problem sind die auftretenden Kanteneffekte, also die fehlende Nachbildung des ÖV-Angebotes außerhalb des Untersuchungsraumes. Da diese Grenzräume fast immer in die Gebiete anderer Verbände oder verbundfreier Regionen hineinreichen, ist das Zusammentragen und Verbinden von Fahrplandaten aus Excel-Datensätzen und PDF-Dateien unvermeidbar (Schwarze 2015; Spiekermann & Schwarze 2014).

Im globalen Maßstab ist die General Transit Feed Specification (GTFS) heute das am häufigsten genutzte offene Fahrplanformat. Für den unternehmensinternen Umgang mit ÖV-Daten kommt gerade in Europa vielfach das HAFAS-Rohdatenformat (HaCon Fahrplan-Auskunfts-System) zum Einsatz. Mitunter wird auch das Standardformat des VDV (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen) verwendet. Die genutzte Routingsoftware muss den Umgang mit den bereitgestellten Datenformaten erlauben. Gerade GTFS-Daten zeichnen sich dadurch aus, dass alle gängigen Softwarelösungen geeignete Importfunktionen besitzen (vgl. Folgeabsatz).

Das Format GTFS entstand 2005²⁰, um Fahrplandaten öffentlich zugänglich zu machen und neue Anwendungsfelder zu erschließen (Antrim & Barbeau 2013, Roth 2010). GTFS-Daten können zum Beispiel für die einfache Verbindungssuche über eine API (application programming interface) abgerufen werden (Chowdhury *et al.* 2014, S. 89). Eine weitere Möglichkeit ist das Auslesen der Bedienungshäufigkeiten von Haltestellen (Bok & Kwon 2016). Zentral ist jedoch ihre Bedeutung für den Aufbau von ÖV-Verkehrsgraphen. In 19 Arbeiten wurden GTFS-Daten verwendet, in weiteren 15 Fällen blieb das genutzte Datenformat unklar (vgl. Anhang 7). HAFAS kommt dagegen nur in fünf Anwendungsfällen zum Einsatz (Djurhuus *et al.* 2016; ÖROK 2018; Spiekermann & Schwarze 2014; Wulforth *et al.* 2010).

Auf regionaler Ebene besteht weiterhin die Herausforderung, dass Fahrplandaten in unterschiedlicher Form, von unterschiedlichen Quellen und mit teilweise unterschiedlichen Haltestellennummern bereitgestellt werden. Hinzu kommt, dass das nötige lokale Wissen fehlt, um die Daten im Gesamtgebiet mit gleichbleibender Qualität zu validieren. Dieser Befund bleibt auch von der Entwicklung einheitlicher Fahrplandate unberührt, da diese weiterhin aus unterschiedlichen Quellen stammen. Auch bestehen bei den Verbänden und Aufgabenträgern aus Wettbewerbs- oder politischen Gründen mitunter Vorbehalte gegenüber der Datenfreigabe (Chowdhury *et al.* 2014, S. 81).

Software zur Modellierung und Berechnung von ÖV-Graphen

Fahrplandaten werden in gerichtete und dreidimensionale Graphen übersetzt. Die Kanten können also nur in eine Richtung passiert werden, zudem sind die Kantengewichte von der Tageszeit abhängig. Diese Besonderheiten führen dazu, dass nur wenige Computerprogramme in der Lage sind, Fahrplandaten in einen ÖV-Graphen zu übersetzen. Zudem sind spezielle Routingalgorithmen erforderlich, um beste Wege für unterschiedliche Raumwiderstände auf diesen Graphen zu ermitteln. Um den Aufbau eines eigenen ÖV-Verkehrsgraphen zu vermeiden,

20 Die Initiative geht zurück auf Google und TriMet (Nahverkehrsbetrieb der Stadt Portland/Oregon USA). Es wurde unter dem Namen *Google transit Feed Specification* eingeführt und später durch *General* ersetzt.

wurde in drei Untersuchungen die webbasierte Abfrage von Verbindungsinformationen über eine API durchgeführt (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Software zur Berechnung von Raumwiderständen im ÖV

Software	Häufigkeit
ArcGIS Network-Analyst	23
PTV Visum	3
Neo4j	2
API	3
OTP	3
unklar	4
sonstige (VBA, Matlab etc.)	5
Σ	44

Quelle: eigene Darstellung

So können beispielsweise über Google Maps Transit²¹ Verbindungsinformationen ausgelesen und damit bereits bestehende ÖV-Graphen und Routingalgorithmen genutzt werden. Dieser Ansatz wurde unter anderem in der Region Göttingen unter Verwendung des R-Moduls ggmap und für die vergleichende Bewertung des ÖV-Angebotes in zehn internationalen Großstädten umgesetzt (Chowdhury *et al.* 2014; Wieland & Dittrich 2016). Dieses Vorgehen hat jedoch den Nachteil, dass die Fahrplandaten weder eingesehen noch bearbeitet werden können. Auf der Makroebene kommt erschwerend hinzu, dass die Anzahl möglicher Abfragen limitiert²² und die Berechnung von Matrizen über mehrere tausend Haltestellen sehr zeitaufwendig ist. Der Einsatz in hochauflösenden regionalen Modellen ist somit nur eingeschränkt möglich. Eine API kann auch genutzt werden, um Fahrplaninformationen abzurufen und diese anschließend in einen eigenen ÖV-Graphen zu übersetzen. Dieses Verfahren ist gerade dann interessant, wenn keine Fahrplandaten zur Verfügung stehen aber dennoch ein eigener ÖV-Graph aufgebaut werden soll. Das Auslesen von Fahrplandaten per API ist jedoch zeitin-

21 <https://maps.google.com/landing/transit/index.html>
(letzter Zugriff: 12.02.2019)

22 Beispielsweise können pro Monat lediglich 20.000 Abfragen über die Directions API von Google durchgeführt werden (Google 2018).

tensiv, weshalb die Beschränkung auf einen einzelnen Betrachtungstag sinnvoll sein kann (Kujala *et al.* 2018, S. 47).

Um die genannten Einschränkungen zu umgehen, werden in der Regel eigene ÖV-Graphen aufgebaut. Zu unterscheiden ist hier die Verwendung kommerzieller bzw. kostenpflichtiger und kostenfreier Software. In den vergangenen Jahren hat sich die Verwendung des ArcGIS® Network Analyst (NA) zur Modellierung und Berechnung von ÖV-Verkehrsgraphen etabliert (vgl. Tabelle 11). Zur Anwendung kommt zumeist das Werkzeug *Add GTFS to a Network Dataset*²³ mit dem es möglich ist, GTFS-Daten in einen herkömmlichen Graphen zu übersetzen (Farber *et al.* 2014; Stępniański & Goliszek 2017; Widener *et al.* 2015).

Gerade in regionalen Modellen erfordert die Berechnung fahrplanfeiner ÖV-Graphen im NA lange Rechenzeiten. Da die Ergebnisse zudem nicht einfach weiterverarbeitet werden können, ist in der Regel eine skriptbasierte Steuerung der Berechnung notwendig. Für diesen Zweck kommen unter anderem Visual Basic, Python und Matlab zur Anwendung (Benenson *et al.* 2011; Kaplan *et al.* 2014; Schwarze 2015). Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von PTV Visum (PTV AG 2018). Dieses erlaubt den Import der gängigen Fahrplanformate über teilweise kostenpflichtige Schnittstellen. Die graphische Oberfläche erhöht gerade in regionalen Modellen die Übersichtlichkeit. Außerdem können Szenarien einfach erstellt und abgespeichert werden. Die integrierte Funktion Haltestellenbereichs-Kenngrößenmatrix berechnen ermöglicht die Ermittlung zahlreicher Raumwiderstände zwischen allen Haltestellen mit einer geringen Rechenzeit (Weiss *et al.* 2018, S. 238). So ist es möglich, minimale oder gewichtete Reisezeiten, Umsteige- und Bedienungshäufigkeiten, aber auch Fahrpreise, Fahrweiten und mittlere Wartezeiten für zahlreiche Relationen zu berechnen. Die Berechnung von Erreichbarkeitsindikatoren auf einem intermodalen Verkehrsgraphen erfolgt anschließend jedoch skriptbasiert unter Einbeziehung der Haltestellenanbindung. Zwar bietet PTV Visum umfassende Anwendungsmöglichkeiten, die Einsatzhäufigkeit ist aufgrund der hohen Kosten aber gering (te Brömmelstroet *et al.* 2017, S. 11). Gleichwohl existieren einige

23 <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=ofa52a75d9ba4abcad6b88bb6285fael> (letzter Zugriff: 12.08.2019)

regionale Erreichbarkeitsmodelle, die auf PTV Visum basieren (Friedrich *et al.* 2016; ÖROK 2018; Weiss *et al.* 2018).

Zwischen 2009 und 2011 wurde der OTP (OpenTripPlanner²⁴) entwickelt, um die Berechnung von ÖV-Graphen zu erleichtern (McHugh & TriMet 2011, S. 8). Da die TriMet bereits maßgeblich an der Entwicklung von GTFS beteiligt war, ist der OTP auf dieses Fahrplandatenformat spezialisiert. Des Weiteren wird über die Integration des Individualverkehrs auf Basis von OSM-Netzen der ausschließliche Einsatz freier Daten garantiert. Der Schwerpunkt liegt jedoch auf der Berechnung von 1-zu-1 oder 1-zu-n Relationen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Dagegen ist es nur mit einem großen Aufwand möglich, Haltestellenmatrizen und damit Erreichbarkeitsindikatoren für zahlreiche Raumeinheiten auf regionaler Ebene zu berechnen (Boisjoly & El-Geneidy 2016; Owen & Levinson 2015).

Eingesetzt wird der OTP zum Beispiel für die Berechnung von Fluchtwegen auf multimodalen Verkehrsnetzen in Entwicklungsländern (Narboneta & Teknomo 2013) oder zur Erstellung einzelner Reisezeitisochronen zur Abbildung der städtischen Mobilität (Conway 2012). Schon früh wurde betont, dass das Ineinandergreifen von GTFS und OTP in der Planungspraxis genutzt werden könnte, um kommerzielle Software zu ersetzen oder überhaupt eine fundierte Planungsgrundlage aufzubauen (Antrim & Barbeau 2013, S. 15). Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Berechnung von n-zu-n Relationen in sehr großen Verkehrsnetzen zu zeitaufwendig ist und die Datenvalidierung ohne Benutzeroberfläche erschwert wird. Häufige Programmfehler führen außerdem dazu, dass ein großer Zeitaufwand notwendig ist, um Ergebnisse mit einer akzeptablen Genauigkeit zu erzielen (Röntgen & Pusch 2019, S. 291). Hinzu kommt, dass Berechnungsergebnisse nicht vollständig nachvollzogen werden können (blackboxing) und nur einige parametrische Anpassungen möglich sind.

Da die vorgestellten Softwarelösungen entweder hohe Kosten verursachen oder erhebliche Schwächen aufweisen, wird mitunter auf vollständige Eigenentwicklungen zurückgegriffen (Fayyaz & Liu 2016; Kujala *et al.* 2018; Martin *et al.* 2008). Bei der Nutzung von Reisezeitmatrizen in großen Gebieten werden die häufig geringen Rechenzeiten als ein

24 Die Initiative geht zurück auf TriMet und OpenPlans (Portland, USA)

Vorteil genannt (Farber *et al.* 2016; Fayyaz & Liu 2016). Die Integration von Eigenentwicklungen in die Planungspraxis und ihre anschließende Verstetigung sind aber zumeist nicht praktikabel.

2.3.3.5 Berechnete Erreichbarkeitsindikatoren

Erreichbarkeitsindikatoren lassen sich in drei Gruppen unterteilen (vgl. Abschnitt 2.1.3). Zu ihnen gehören auch die einfachen und infrastruktur-basierten Indikatoren, die die Qualität und Zugänglichkeit des öffentlichen Verkehrsangebotes an einem Standort bewerten (Spiekermann & Neubauer 2002, S. 9). Die Zugänglichkeit wird zumeist über die Anzahl an Haltestellen in einem Gebiet oder ihre Entfernung zu relevanten Raumstrukturen gemessen (Biba *et al.* 2010; Bok & Kwon 2016; Wu & Hine 2003). In der Praxis ist sie ein häufig verwendetes Kriterium, beispielsweise als festgelegte Maximaldistanz zwischen Wohnstandorten und nächsten Haltestellen (FGSV 2010, S. 17) oder als zusammengesetzter Index aus der Haltestellenentfernung und dem Linien- und Fahrtenangebot (Inayathusein & Cooper 2018, S. 8; Wu & Hine 2003).

Um die Qualität des gesamten ÖV-Angebotes zu bewerten, wird die Verwendung von komplexen Erreichbarkeitsindikatoren empfohlen, welche die Realisierbarkeit von Aktivitäten ins Zentrum rücken (Geurs & van Wee 2004, S. 128; Handy & Niemeier 1997, S. 1175; Kwan 1998, S. 192). Zu diesen Messgrößen gehören Reiseaufwands-, Kumulations- und Potenzialindikatoren. Mit ihnen kann das ÖV-Angebot über reale Verbindungen zwischen Wohnstandorten und Gelegenheiten bewertet werden (Verbindungsqualität). Da intermodale Verkehrsgraphen auch die Anbindung von Haltestellen berücksichtigen, ist die Erschließung als indirekte Größe in diesen Indikatoren bereits enthalten. Untersuchungen konnten zeigen, dass die Verbindungsqualität des ÖV eine deutlich bessere Erklärung des Modal-Split ermöglicht, als seine bloße Erschließungswirkung (Moniruzzaman & Páez 2012). Vergessen werden darf jedoch nicht, dass ein Verzicht auf die Verbindungsqualität zumeist nicht methodisch, sondern eher technisch begründet ist. So wird die besondere Komplexität des öffentlichen Verkehrs betont, welche die tageszeitgenaue Berechnung von Raumwiderständen in größeren Gebieten deutlich erschwert (Nassir *et al.* 2016, S. 27).

Wie in Abschnitt 2.1.3.2 ausgeführt, zeichnen sich gerade Kumulations- und Potenzialindikatoren dadurch aus, dass zahlreiche Verbindungen zu berechnen und anschließend zu gewichten sind (n-zu-n Relationen). Wesentlich häufiger ist daher die Verwendung von Reiseaufwandsindikatoren in großen regionalen Modellen (Martin *et al.* 2002; Mavoja *et al.* 2012; ÖROK 2018). Kumulations- und Potenzialindikatoren kommen hingegen primär in Erreichbarkeitsmodellen mit weniger als 10 Tsd. Raumeinheiten zum Einsatz (vgl. Tabelle 12). Die einzige Ausnahme bildet das Modell der Metropolregion Tel Aviv (IL) von Benenson *et al.* (2017b). Für mehr als 100 Tsd. Gebäude wurde die Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen im ÖV und im MIV berechnet. Allerdings ist jedes Gebäude nur an eine Haltestelle über die Luftlinienweite angebunden.

Der Vergleich der 44 Forschungsarbeiten zeigt, dass in den letzten etwa fünf Jahren immer höher aufgelöste regionale Erreichbarkeitsmodelle zur Berechnung komplexer Erreichbarkeitsindikatoren herangezogen wurden. Dennoch sind der Berechnung komplexer Erreichbarkeitsindikatoren nach wie vor Grenzen gesetzt. Indikatoren, die auf Widerstandsberechnungen für zahlreiche Zeitscheiben oder detaillierte ÖV-Wege in hochaufgelösten Räumen beruhen, existieren bisher nicht.

Tabelle 12: Verwendete Erreichbarkeitsindikatoren nach Menge der Raumeinheiten

Mehrfachnennungen möglich

Indikatoren	Raumeinheiten				Σ
	<=1 Tsd.	<=10 Tsd.	<=100 Tsd.	>100 Tsd.	
<i>einfache</i>	2		1		3
<i>komplexe</i>					
Reiseaufwandsindikator	5	3	4	3	15
Kumulationsindikator	7	7		1	15
Potenzialindikator/WATT	2	6		1	9
Isochronen	2	1	1		4
Reisezeitmatrizen		5	1		6
<i>personenbasierte</i>	2				2
Σ	20	22	7	5	53

Quelle: eigene Darstellung

Ein weiterer Anwendungsfall sind personenbasierte Erreichbarkeitssindikatoren. Mit ihnen ist es möglich, den gesamten täglichen Interaktionsraum von Individuen nachzubilden und die Erreichbarkeit in Abhängigkeit von Tagesabläufen zu berechnen (vgl. Abschnitt 2.1.3.3). Auf regionaler Ebene sind die von Widener *et al.* (2015) berechneten Erreichbarkeiten von Supermärkten auf Heimwegen vom Arbeitsplatz hervorzuheben. Sie konnten eine um 12% höhere Erreichbarkeit bei dieser Kombination von Aktivitäten feststellen (ebd., S. 79ff.). Durchgeführt wurde diese Berechnung jedoch nur für 359 Verkehrszellen. Zudem sind zahlreiche Aktivitätsketten denkbar, jede einzelne ist jedoch ein Sonderfall. Zusätzlich erschweren die aufwendige Berechnung und die anspruchsvolle Interpretation ihren Einsatz in der Planungspraxis.

2.3.4 Zwischenfazit: Die Detaillierung von ÖV-Verkehrsgraphen

In der Vergangenheit konnte eine Entwicklung zu immer komplexeren regionalen Erreichbarkeitsmodellen unter Einbeziehung öffentlicher Verkehrsmittel beobachtet werden. Spätestens seit dem Jahr 2010 werden immer wieder hochaufgelöste Modelle mit teilweise mehr als 100 Tsd. Raumeinheiten aufgebaut. Die Menge der Raumeinheiten wird auch durch den zunehmenden Einsatz von Rastermodellen gesteigert. Neben der räumlichen Auflösung erhöht sich zunehmend auch die Detaillierung der ÖV-Verkehrsgraphen. Fahrplanfeine und intermodale ÖV-Graphen garantieren die Berechnung der Raumwiderstände von Tür-zu-Tür. Gleichwohl werden an unterschiedlichen Stellen weiterhin Vereinfachungen vorgenommen. Dazu gehören die Anbindung von wenigen Haltestellen über Luftlinien, der Verzicht auf die SWZ oder das Fehlen von Fahrpreisen. Bisher existieren nur wenige Modelle, deren intermodale ÖV-Verkehrsgraphen auf allen Etappen eine einheitlich hohe Detaillierung ermöglichen.

Die skizzierte Entwicklung wird auch durch die verbesserte Bereitstellung von Fahrplandaten begünstigt. Zudem hat sich mit dem Datenformat GTFS bereits ein international anerkanntes Format zur Strukturierung und Weitergabe von Fahrplaninformationen durchgesetzt. Gleichwohl werden, gerade in Deutschland, für große Gebiete nach wie vor keine

Fahrplandaten bereitgestellt. Erschwerend kommt hinzu, dass Daten für unterschiedliche Gebiete aus verschiedenen Quellen nicht ohne große Anpassungen verknüpft werden können. Bei der Berechnung von Raumwiderständen unter Berücksichtigung fahrplanfeiner Verbindungsinformationen hat sich der ArcGIS NA als Quasistandard durchgesetzt. Nahezu alle international durchgeführten Untersuchungen basieren auf diesem Softwarepaket. Der OTP stellt einen interessanten Ansatz dar, um ÖV-Routings mit freier Software durchzuführen. In der praktischen Anwendung haben sich jedoch immer wieder Schwächen gezeigt, die einer umfassenden Anwendung und dauerhaften Verstetigung im Wege stehen. Gezeigt hat sich außerdem, dass Modelle mit mehr als 10 Tsd. Raumeinheiten zumeist nur zur Berechnung von Reiseaufwandsindikatoren genutzt werden. Kumulations- und Potenzialindikatoren sowie mittlere Raumwiderstände in Zeitintervallen erhöhen den Rechenaufwand in einem Umfang, der ihre Berücksichtigung in hochaufgelösten Modellen erschwert. Zumal für ihre Berechnung eine skriptbasierte Steuerung der Routingsoftware notwendig ist.

Die Berechnung von Raumwiderständen in ÖV-Erreichbarkeitsmodellen wurde in den letzten Jahrzehnten zunehmend vereinfacht. Gleichwohl ist es bisher nicht gelungen, detaillierte und intermodale ÖV-Verkehrsgraphen mit einfachen Werkzeugen und in hochaufgelösten Raumbezugssystemen zur Berechnung komplexer Erreichbarkeitsindikatoren zur Anwendung zu bringen. Nach wie vor ist ein umfangreiches Expertenwissen erforderlich, um insbesondere die Aufbereitung und Validierung von ÖV-Verkehrsgraphen zu gewährleisten. Die lückenhafte Bereitstellung elektronisch lesbarer Fahrplandaten erschwert diese Arbeiten zusätzlich.

3 **Aufbau eines regionalen Erreichbarkeitsmodells**

Wie muss ein Erreichbarkeitsmodell aufgebaut sein, um multimodale und kleinräumige Erreichbarkeiten mit einer hohen Genauigkeit abzubilden?

Die erste Forschungsfrage dieser Arbeit widmet sich dem Aufbau eines regionalen und hochaufgelösten Erreichbarkeitsmodells. Dieses Erreichbarkeitsmodell soll auf etablierter Software basieren und die Berechnung komplexer Erreichbarkeitsindikatoren ermöglichen. Ein besonderer Schwerpunkt ist die weitgehende Integration des öffentlichen Verkehrssystems. Der gewählte Ansatz sollte in die Planungspraxis übertragbar sein, eine einfache Aktualisierung ermöglichen und die flexible Berechnung von Planfällen erlauben. Mit diesem Modell wird auch der Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen untersucht (vgl. Kapitel 5).

Das Erreichbarkeitsmodell wurde zwischen 2014 und 2017 im Rahmen des Leitprojektes »Regionale Erreichbarkeitsanalysen« (Peter & Gertz 2017) aufgebaut und zur Beantwortung der Forschungsfragen um weitere Indikatoren, Raumbezugssysteme und Netzelemente erweitert. Die Erreichbarkeitswerte für das bewohnte 100-Meter-Raster und das flächendeckende 500-Meter-Raster (mit gewichteten Zentroiden) sind über das Erreichbarkeitsportal der MRH öffentlich zugänglich (MRH o.J.a).

Im ersten Abschnitt werden die Anforderungen an ein regionales Erreichbarkeitsmodell diskutiert. Anschließend erfolgen die Vorstellung des Untersuchungsgebietes (Abschnitt 3.2) und des Modellaufbaus (Abschnitt 3.3). Das Modell umfasst verschiedene Raumbezugssysteme und Gelegenheiten (Abschnitt 3.4) sowie die Verkehrsgraphen aller Verkehrsmodi (Abschnitt 3.5). Im Abschnitt 3.6 werden die berechneten Erreichbarkeitsindikatoren und einzelne Erreichbarkeitskarten vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer Einschätzung zur Modellperformance und Modellgenauigkeit sowie den Möglichkeiten und Grenzen der Praxisintegration.

3.1 Anforderungen an ein regionales Erreichbarkeitsmodell

Zu Beginn des Leitprojektes »Regionale Erreichbarkeitsanalysen« wurden die Modellanforderungen von den Praxispartnern formuliert. Gleichwohl weisen diese eine hohe Ähnlichkeit zu anderen regionalen Erreichbarkeitsmodellen auf (vgl. Abschnitt 1.4). Hinsichtlich der Anforderungen ist also von einer hohen Verallgemeinerbarkeit auszugehen. Die Erreichbarkeitsanalysen sollen für alle Verkehrsmodi durchgeführt werden und insbesondere auf einer detaillierten Integration des ÖPNV basieren. Dabei sind vergleichbare Raumwiderstände für die unterschiedlichen Verkehrsmodi zu liefern. Salonen & Toivonen (2013, S. 150) haben gezeigt, dass die Reisezeiten in allen Verkehrsmodi mit einer zunehmenden Detaillierung der Verkehrsgraphen steigen. Daher reduziert sich die Vergleichbarkeit von Raumwiderständen bei Verwendung unterschiedlicher Detaillierungen erheblich. Es sind daher nur Netzelemente zu verwenden, die eine hohe Modellgüte bei einer gleichzeitig gegebenen Nutzbarkeit gewährleisten. Zu diesen Netzelementen gehören beispielsweise die Haltestellenanbindung auf einem Fußwegenetz, die Integration eines Höhenmodells und die Berücksichtigung belastungsabhängiger Reisezeiten im MIV.

Eine weitere Anforderung ist der Aufbau einer Strukturdatenbasis mit allen relevanten Gelegenheitstypen, da eine solche Datenbasis unterschiedliche Anwendungsmöglichkeit garantiert. Zu den wichtigsten Gelegenheitstypen gehören insbesondere die Standorte der Daseinsvorsorge wie Schulen und medizinische Einrichtungen. Da die notwendigen Daten häufig nicht oder nicht einheitlich zur Verfügung stehen, soll auch auf freie Datenquellen zurückgegriffen werden.

Mit diesem Erreichbarkeitsmodell wird zudem das Ziel verfolgt, einzelne Gemeinden und Kreise innerhalb der MRH bei ihren kleinteiligen Planungsaufgaben zu unterstützen. Als primäres Raumbezugssystem soll daher das bewohnte 100-Meter-Raster aus dem Zensus von 2011 verwendet werden (Destatis 2015). Die Kombination eines multimodalen Verkehrsgraphen mit einer hohen räumlichen Auflösung garantiert auch auf lokaler Ebene eine zuverlässige Erreichbarkeitsberechnung. Um auch für noch nicht bewohnte Gebiete die Erreichbarkeitsverhältnisse

darzustellen, wurde im Projektverlauf ein flächendeckendes 500-Meter-Raster als zusätzliches Raumbezugssystem integriert.

Die Erreichbarkeitsverhältnisse sollen mit Hilfe der klassischen komplexen Erreichbarkeitsindikatoren bewertet werden (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Diese umfassen Reiseaufwands-, Kumulations- und Potenzialindikatoren. Darüber hinaus muss es möglich sein, die berechneten Erreichbarkeitswerte in einem Online-Portal bereitzustellen. Der Transfer des eigentlichen Erreichbarkeitsmodells inklusive der Rechenalgorithmen in die Planungspraxis wurde aber nicht als Projektziel definiert.

Für die in dieser Arbeit vorgestellten Analysen wurden die Raumbezugssysteme um weitere Auflösungsstufen und die Verkehrsgraphen um zusätzliche Netzelemente ergänzt. Zu diesen gehören die flächendeckenden 1- und 5-Kilometer-Raster sowie unterschiedlich detaillierte Verfahren zur Modellierung der Haltestellenanbindung.

3.2 Vorstellung des Untersuchungsgebietes

Die Metropolregion Hamburg ist eine von elf Metropolregionen in Deutschland und umfasst eine Fläche von 28.500 Quadratkilometern. Gleichzeitig ist sie die einzige Metropolregion, die Teilgebiete von vier Bundesländern einschließt (vgl. Karte 1). Acht Metropolregionen überschreiten hingegen maximal eine Landesgrenze. Diese besondere Konstellation erschwert den Aufbau der Strukturdatenbasis in besonderer Weise und führt zu einer Vielzahl an räumlichen, rechtlichen und organisatorischen Sonderfällen (vgl. Abschnitt 2.2.5). Die MRH beinhaltet 17 Kreise und Landkreise²⁵ sowie drei kreisfreie Städte und hat rund 5,36 Mio. Einwohner (BKG 2018). Im Zentrum der MRH liegt die Freie und Hansestadt Hamburg (FHH) mit etwa 1,84 Mio. Einwohnern.²⁶ Sie ist das Bildungs-, Versorgungs- und kulturelle Zentrum, übergeordneter Verkehrsknoten und Arbeitsplatzschwerpunkt mit umfangreichen Pendlerverflechtungen.

25 In Schleswig-Holstein werden die Landkreise als Kreise bezeichnet. Auf eine getrennte Schreibweise wird in dieser Arbeit verzichtet.

26 <https://www.statistik-nord.de/daten/bevoelkerung-und-gebiet/monatszahlen-4/> (letzter Zugriff: 25.06.2019)

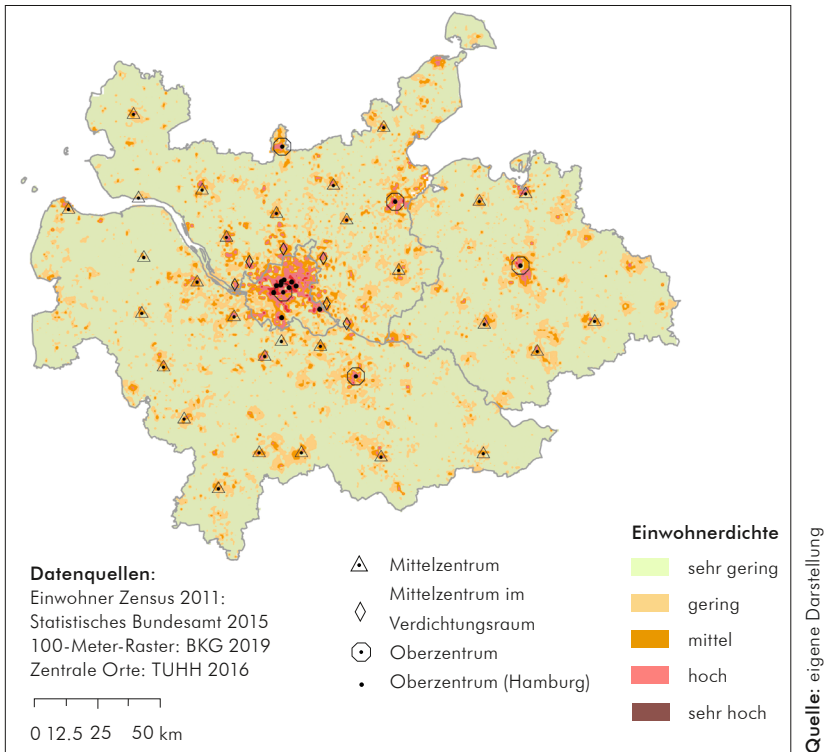
Karte 1: Räumliche Gliederung der MRH



Die herausgehobene Stellung der FHH wird auch durch die starke Bevölkerungskonzentration innerhalb der MRH verdeutlicht (vgl. Karte 2). Ihre Siedlungsachsen sind die dynamischsten Räume in der Region und die nationalen und internationalen Verkehrswege schneiden das Hamburger Stadtgebiet (vgl. Karte 3). In Hamburg liegt außerdem der größte Seehafen Deutschlands mit einem Güterumschlag von 135,1 Mio. Tonnen und 8,73 Mio. Containern im Jahr 2018²⁷. Die hohen Umschlagszahlen des Hamburger Hafens und die Transitverkehre nach Skandinavien und ins östliche Europa führen zu einer hohen Belastung der Verkehrsinfrastruktur. Eine zusätzliche Nachfrage erzeugen die Urlaubs- und Freizeitverkehre an die Nord- und Ostsee.

²⁷ <https://www.hafen-hamburg.de/de/statistiken> (letzter Zugriff: 30.06.2019)

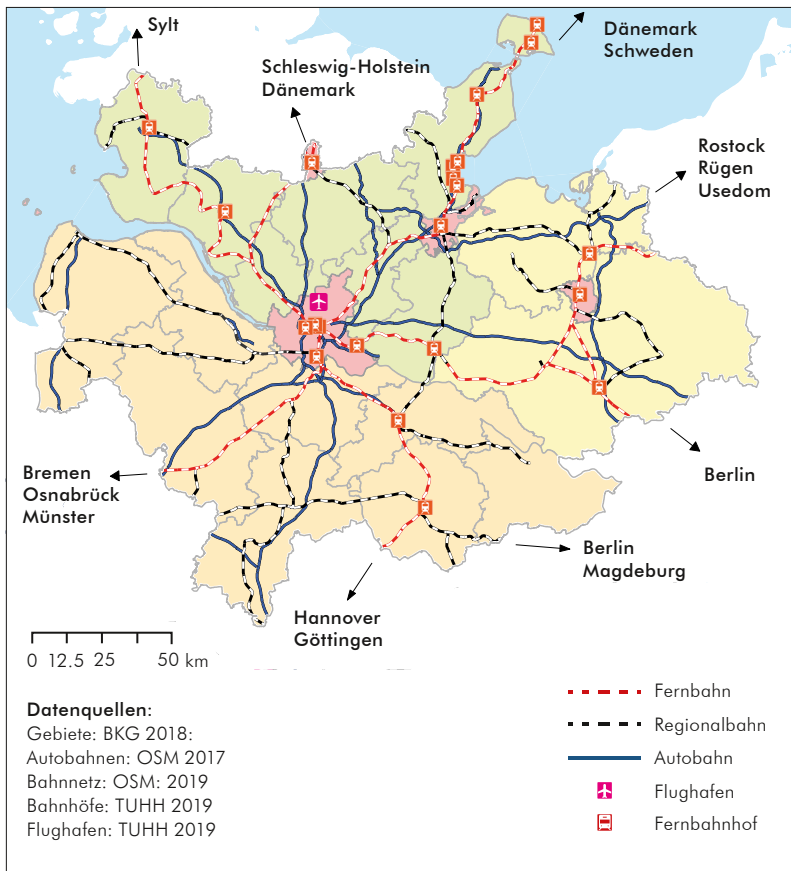
Karte 2: Bevölkerungsverteilung und zentrale Orte in der MRH



Die Bewohner der MRH legen täglich rund 16,5 Millionen Wege mit einer durchschnittlichen Länge von 12,9 Kilometern zurück. Auf den MIV entfallen 51% dieser Wege, auf den öffentlichen Verkehr 12% und den NMIV 35% (infas *et al.* 2018b, S. 9). Von allen Einwohnern nutzen 75% zumindest monatlich den ÖV, im MIV liegt dieser Wert bei 64% (ebd., S. 13). Gleichwohl sind deutliche Unterschiede zwischen Hamburg einerseits und peripheren ländlichen Gebieten andererseits sichtbar. Zu den ländlichen Regionen gehören die Landkreise in Mecklenburg-Vorpommern, Lüchow-Dannenberg in Niedersachsen und Dithmarschen in Schleswig-Holstein. Diese Räume sind außerdem durch eine wesentlich geringere wirtschaftliche Dynamik und eine ungünstige demographische Entwicklung gekennzeichnet. Gerade in den Landkreisen

Nordwestmecklenburg, Ludwigslust-Parchim, Lüchow-Dannenberg und Uelzen wird bis 2035 mit einem weiteren Bevölkerungsrückgang zwischen 10 und 15% gerechnet (Slupina *et al.* 2019, S. 16). Hamburg und sein erweitertes Umland weisen hingegen eine wesentlich günstigere demographische Perspektive auf (ebd., S. 16ff.). Die MRH steht also vor der Herausforderung, Räume unterschiedlicher Dynamik zu vereinen, wachsende Verkehrsströme zu bewältigen und die Folgen der demographischen Entwicklung abzufedern.

Karte 3: Hauptverkehrsnetz in der Metropolregion Hamburg



Quelle: eigene Darstellung

Die Geschichte der MRH reicht zurück in das Jahr 1919. Vor bereits einhundert Jahren wurde vom Hamburger Oberbaudirektor Fritz Schumacher das »*Achsenmodell*« als eine an den Schnellbahnlinien orientierte Siedlungsentwicklung vorgestellt.²⁸

Diese stadtplanerische Strategie wies über die damaligen Grenzen Hamburgs²⁹ deutlich hinaus und beeinflusste so auch die Entwicklung im heutigen Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Die institutionalisierte Zusammenarbeit begann jedoch erst in den 1950er und 1960er Jahren.³⁰ Bilaterale Abkommen für eine gemeinsame Landesplanung wurden geschlossen und die Förderfonds Hamburg/Niedersachsen und Hamburg/Schleswig-Holstein eingerichtet (1960/1962).

Die Intensivierung der Zusammenarbeit und weitere räumliche Erweiterungen erfolgten in den Jahren 1996 und 2000 im Rahmen von regionalen Entwicklungskonzepten. Mit dem Planungsrat, der Regionalkonferenz, Lenkungsausschüssen und Förderfonds startete 1997 eine gemeinsame Landesplanung im Gebiet der MRH. Mit Inkrafttreten eines neuen Staatsvertrages am 01. Mai 2012 erfolgte mit den Landkreisen Nordwestmecklenburg und Ludwigslust (ab 01.01.2017 Gesamtgebiet Ludwigslust-Parchim) die Erweiterung der MRH nach Mecklenburg-Vorpommern. Gleichzeitig traten der Kreis Ostholstein und die kreisfreien Städte Lübeck und Neumünster (jeweils in Schleswig-Holstein) der Metropolregion bei.³¹ Die heutige Gebietsausdehnung wurde mit der

28 Fritz Schumacher (1919): Schemata der natürlichen und wirklichen Entwicklung des Organismus Hamburg; (<https://www.bildindex.de/document/obj32033282>, letzter Zugriff: 30.03.2019).

29 U. a. wurden die Städte Altona und Bergedorf erst 1938 eingemeindet (Groß-Hamburg-Gesetz).

30 <https://metropolregion.hamburg.de/geschichte-historie/> (letzter Zugriff: 25.06.2019)

31 Bekanntmachung über den Zeitpunkt des Inkrafttretens des Staatsvertrages zwischen der Freien und Hansestadt Hamburg, dem Land Mecklenburg-Vorpommern, dem Land Niedersachsen und dem Land Schleswig-Holstein zur Änderung des Staatsvertrages zwischen der Freien und Hansestadt Hamburg, dem Land Niedersachsen und dem Land Schleswig-Holstein über die Finanzierung der Zusammenarbeit in der Metropolregion Hamburg und die Fortführung der Förderfonds. In: Nds. GVBl. Nr. 7/2012, ausgeg. am 10. Mai 2012.

Aufnahme der Landeshauptstadt Schwerin (Mecklenburg-Vorpommern) am 01.03.2017 erreicht.

Eine Untersuchung der OECD³² kommt zu dem Ergebnis, dass die »Zusammenarbeit und Integration metropolregionsweit noch gesteigert werden kann«, um u. a. den Wohnungsbau und die Mobilität so zu steuern, dass »die Vorteile des Ballungsraums maximiert und auf die ganze Metropolregion verteilt werden« (OECD 2019, S. 194). Trotz der wachsenden Dringlichkeit verfügt die MRH bisher weder über Weisungsbefugnisse noch über eine klare Planungshoheit. Zweck und Ziel der Zusammenarbeit sind eine »Erhöhung der nationalen und internationalen Wettbewerbsfähigkeit sowie die Stärkung der Sichtbarkeit nach Außen sowie der Zusammenhalt und die Kooperation innerhalb der Region« (Artikel 2 Abs. I Kooperationsvertrag³³). Die MRH dient außerdem als »Impulsgeber für die Regionalentwicklung, formuliert Strategien und Handlungsansätze, initiiert und entwickelt Kooperationsprojekte und setzt sie gemeinsam mit den Akteuren um«. ³⁴ Ihre Hauptaufgaben sind die Durchführung von Leitprojekten, die Organisation von Fachtagungen und Regionalkonferenzen sowie die Präsentation der Metropolregion nach außen. ³⁵ In diesem Rahmen kann sie die Entwicklung von Informations- und Planungswerkzeugen vorantreiben, die tatsächliche Nutzung obliegt aber den Landkreisen und Gemeinden. Insofern ist ein enger Austausch mit allen Gebietskörperschaften unabdingbar, um geeignete Werkzeuge für unterschiedliche Fragestellungen und im Kontext regionaler Besonderheiten bereitzustellen.

32 Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung.

33 Der Kooperationsvertrag über die Zusammenarbeit in der Metropolregion Hamburg ist am 01. März 2017 in Kraft getreten.

34 Strategischer Handlungsrahmen 2017 – 2020 der Metropolregion Hamburg; in Kraft getreten am 18. Mai 2017.

35 Arbeitsprogramm 2019 der Metropolregion Hamburg (<https://metropolregion.hamburg.de/contentblob/3818832/d1031bcea9doe9310992c944704d323f/data/arbeitsprogramm-mrh-2018.pdf>; letzter Zugriff: 30.06.2019)

3.3 Modellaufbau und technische Umsetzung

Erreichbarkeitsmodelle bestehen in der Regel aus einem Verkehrsgraphen zur Berechnung der Raumwiderstände, mindestens einem Raumbezugssystem, unterschiedlichen Gelegenheiten sowie Algorithmen, die der Berechnung und dem Vergleich von Erreichbarkeitsindikatoren dienen. Die berechneten Erreichbarkeitswerte können anschließend über Karten oder Diagramme visualisiert werden. Mitunter wird auf den Einsatz von Verkehrsgraphen zugunsten euklidischer Distanzen verzichtet (vgl. Abschnitt 4.3). Bei der Berechnung von infrastrukturbasierten Erreichbarkeitsindikatoren ist auch der Verzicht auf Gelegenheiten möglich (vgl. Abschnitt 2.1.3.1). In dieser Arbeit wird ein multimodales Erreichbarkeitsmodell erstellt, welches getrennte Verkehrsgraphen für den MIV, den NMIV und den ÖV beinhaltet (vgl. Abbildung 25).

Für den Vergleich unterschiedlicher räumlicher Auflösungen hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit umfasst das Modell vier Raster- und zwei Vektormodelle (vgl. Kapitel 5). Die Gelegenheiten sind zumeist standortscharf und für zahlreiche Aktivitätstypen vorhanden (Abschnitt 3.4). Die Erreichbarkeitsindikatoren der 24 Gelegenheitstypen mit etwa 600 Tsd. Einrichtungen werden für rund 430 Tsd. Raumeinheiten in den sechs Raumbezugssystemen berechnet. Zum Einsatz kommen Reiseaufwands, Kumulations- und Potenzialindikatoren (Abschnitt 3.6). Die Ergebnisse werden über Erreichbarkeitskarten, Erreichbarkeitsdiagramme und das Erreichbarkeitsportal der MRH visualisiert (MRH o.J.a).

Das Erreichbarkeitsmodell der MRH umfasst in seiner höchsten Auflösung u. a. 289.789 bewohnte 100-Meter-Zellen und 29.615 Haltestellenbereiche. Lange Rechenzeiten und die große Datenmenge erfordern eine zumindest teilautomatisierte Berechnung der Erreichbarkeitsindikatoren (vgl. Abbildung 26). Vier Hauptaufgaben sind zu unterscheiden:

1. Routing im Verkehrsgraphen des ÖV
2. Routing in den Verkehrsgraphen des MIV und NMIV
3. Berechnung der Erreichbarkeitsindikatoren aus den Raumwiderständen
4. Speicherung, Aufbereitung und Darstellung der Ergebnisse

Routings dienen der Berechnung von Raumwiderständen auf den Verkehrsgraphen der einzelnen Verkehrsmodi. Der ÖV ist als intermodales Verkehrssystem in das Erreichbarkeitsmodell integriert. Die Anbindung an die Haltestellen erfolgt im Fußverkehr, die Berechnung der Raumwiderstände zwischen den Haltestellen auf Basis realer Fahrplandaten (vgl. Abschnitt 3.5.1). Die Verkehrsgraphen des Individualverkehrs (IV) werden in einer GDB (Geodatabase) vorgehalten. Die Widerstandsberechnung erfolgt mit dem ArcGIS Network Analyst (©ESRI) (vgl. Abschnitt 3.5.2 und 3.5.3). Die Berechnung der Raumwiderstände zwischen allen Haltestellenbereichen basiert auf den realen Fahrplandaten des Jahresfahrplans 2019. Das Fahrplanmodell ist im Programm PTV Visum hinterlegt (PTV AG 2018). Mit dieser Software wird auch die Berechnung der Raumwiderstände zwischen den Haltestellenbereichen durchgeführt (vgl. Abschnitt 2.3.3.4).

Abbildung 25: Bestandteile und Aufbau eines Erreichbarkeitsmodells

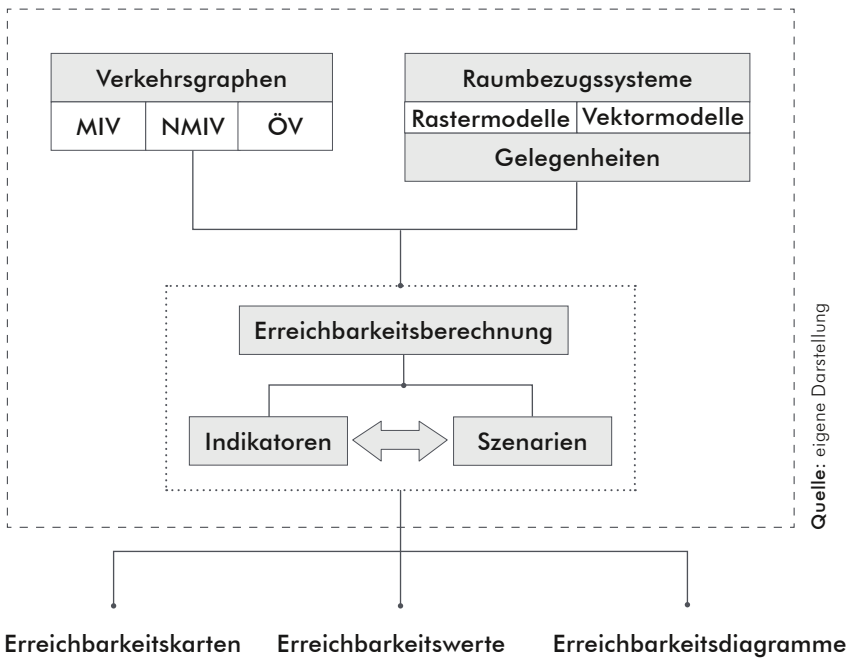
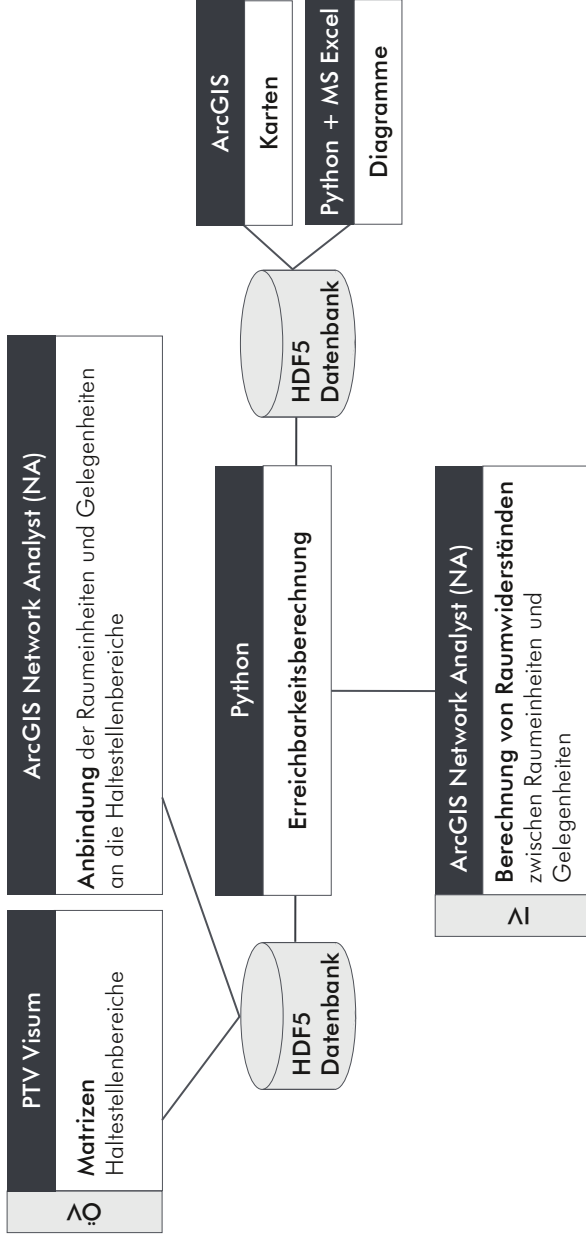


Abbildung 26: Technischer Aufbau des Erreichbarkeitsmodells



Quelle: eigene Darstellung

Die vorberechneten Anbindungen an die Haltestellen und die Widerstandsmatrizen des ÖV werden in einer HDF5-Datenbank³⁶ gespeichert (vgl. Abbildung 26). Die Python-Standardmodule NumPy und Pandas gewährleisten einen einfachen und effizienten Datenzugriff. Für das monomodale Routing auf den Verkehrsgraphen des Individualverkehrs (MIV und NMIV) zwischen den Raumeinheiten und den Gelegenheiten ist keine Zwischenspeicherung notwendig. Die Python-Schnittstelle zur Erreichbarkeitsberechnung steuert die Berechnung minimaler Raumwiderstände im IV und ÖV. Zur Berechnung der minimalen Raumwiderstände im ÖV wird auf die vorberechneten Tabellen zurückgegriffen.

Alle Ergebnisse werden anschließend in der HDF5-Datenbank abgelegt. Das Modul zur Erreichbarkeitsberechnung und zur Anbindung von Raumeinheiten und Gelegenheiten an die Haltestellen ist auch als ArcGIS-Toolbox implementiert. Solche Toolboxes können dem Anwender die Erreichbarkeitsberechnung erleichtern und wurden bereits in anderen Forschungsprojekten erstellt (Liu & Zhu 2004, S. 111; Hellmanns & Klein 2015, S. 41). Die Gestaltung von Erreichbarkeitskarten erfolgt in ArcGIS, für die Erstellung von Erreichbarkeitsdiagrammen wird auf eine Kombination aus Python und MS Excel zurückgegriffen.

3.4 Aufbau der Raumbezugsysteme und der Strukturdatenbasis

Das in dieser Arbeit verwendete Erreichbarkeitsmodell beinhaltet sechs Raumbezugsysteme mit unterschiedlichen Auflösungen. Die Datenbasis wird um die Standorte von Einrichtungen aus 24 Gelegenheits-typen ergänzt. Die nachfolgenden Abschnitte geben einen Überblick über die Datenaufbereitung und die genutzten Datenquellen.

3.4.1 Raumbezugsysteme und Raumeinheiten

In Tabelle 13 sind alle in dieser Arbeit verwendeten Raumbezugsysteme aufgeführt. Das bewohnte 100-Meter-Raster ist das Referenzsystem und liefert die Grundlage für die Einwohnergewichtung der Zentroide. Vom 100-Meter-Raster abgesehen, sind alle Raumbezugsysteme

³⁶ Hierarchical Data Format; <https://www.hdfgroup.org/solutions/hdf5/>
(letzter Zugriff: 01.07.2019)

flächendeckend aufgebaut. Die Erreichbarkeitsindikatoren werden für die gewichteten und geometrischen Zentroide der Raumeinheiten aller Aggregationslevel berechnet.

Tabelle 13: Die Raumbezugssysteme des Erreichbarkeitsmodells

gewichtet = gewichtet über die Einwohnerverteilung

Auflösung	Zentroide	Raumeinheiten
100-Meter-Raster (bewohnt)	geometrisch	289.789
500-Meter-Raster	geometrisch/gewichtet	115.913
1-Kilometer-Raster	geometrisch/gewichtet	29.477
5-Kilometer-Raster	geometrisch/gewichtet	1.140
Gemeinden	geometrisch/gewichtet	1.123
statistische Gebiete (Hamburg)	geometrisch/gewichtet	941
Σ		438.383

Quelle: eigene Darstellung

Auf die Berücksichtigung der 2,55 Mio. unbewohnten 100-Meter-Zellen wurde verzichtet, da der zusätzliche Rechenaufwand den Nutzen übersteigt. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die kleinräumigen Erreichbarkeitsindikatoren insbesondere für bereits bewohnte Areale relevant sind. Die Geodaten der einzelnen Raumbezugssysteme stammen vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG 2019) sowie dem statistischen Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (Statistikamt Nord).³⁷ Die einzelnen Rastermodelle sind hierarchisch und passgenau aufgebaut (vgl. Karte 4).

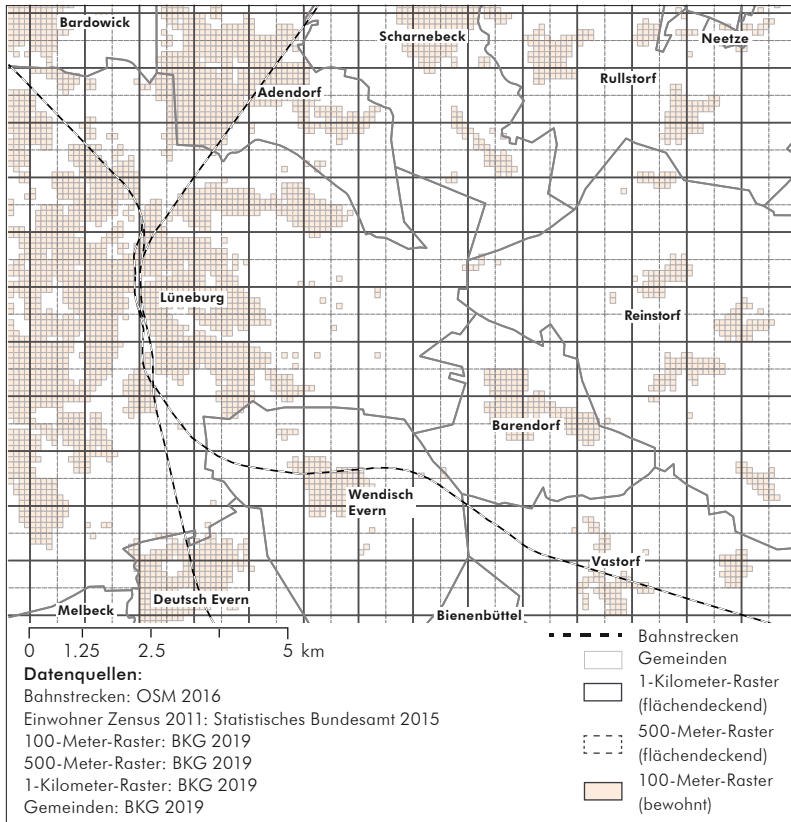
In der MRH befinden sich 1.123 Gemeinden und gemeindefreie Gebiete³⁸ mit einer Fläche von 0,86 km² bis 738,54 km² sowie einer Bevölkerungsdichte bis 2.478,67 Einwohnern/km². Die Aggregation getrennter Ortsteile zu Gemeinden verringert die Repräsentativität eines Zentroiden gegenüber der Wohnbevölkerung, da Gemeinden auch

³⁷ Vom Statistikamt Nord stammen ausschließlich die statistischen Gebiete: <https://metaver.de/trefferanzeige?cmd=doShowDocument&docuuid=B3074B4B-F55C-4AF8-B1B8-EBB11485686B&plugid=/ingrid-group:igeiplug-HH> (letzter Zugriff: 13.07.2019)

³⁸ Dies sind die Forstgutbezirke Sachsenwald und Buchholz in Schleswig-Holstein sowie die gemeindefreien Gebiete Gohrde und Gartow in Niedersachsen.

aus mehreren räumlich separierten Siedlungskernen bestehen können. Da Hamburg als Gemeinde klassifiziert wird, ist hier eine weitere Unterteilung aufgrund der Größe, der hohen Bevölkerungszahl und der dispersen Siedlungsstruktur unablässig. Eine solche Unterteilung sollte in Großstädten in der Regel einfach anzuwenden sein, da Einteilungen unterhalb von Stadtteilen bereits etabliert sind. Die Repräsentativität von Erreichbarkeitswerten auf Ebene der statistischen Gebiete Hamburgs sollte also auf vergleichbare Raumeinteilungen in anderen Großstädten übertragbar sein. Hamburg verfügt über 941 statistische Gebiete mit einer durchschnittlichen Fläche von 0,79 km² (Statistisches Landesamt 1991).

Karte 4: Raumbezugssysteme am Beispiel von Lüneburg



Quelle: eigene Darstellung

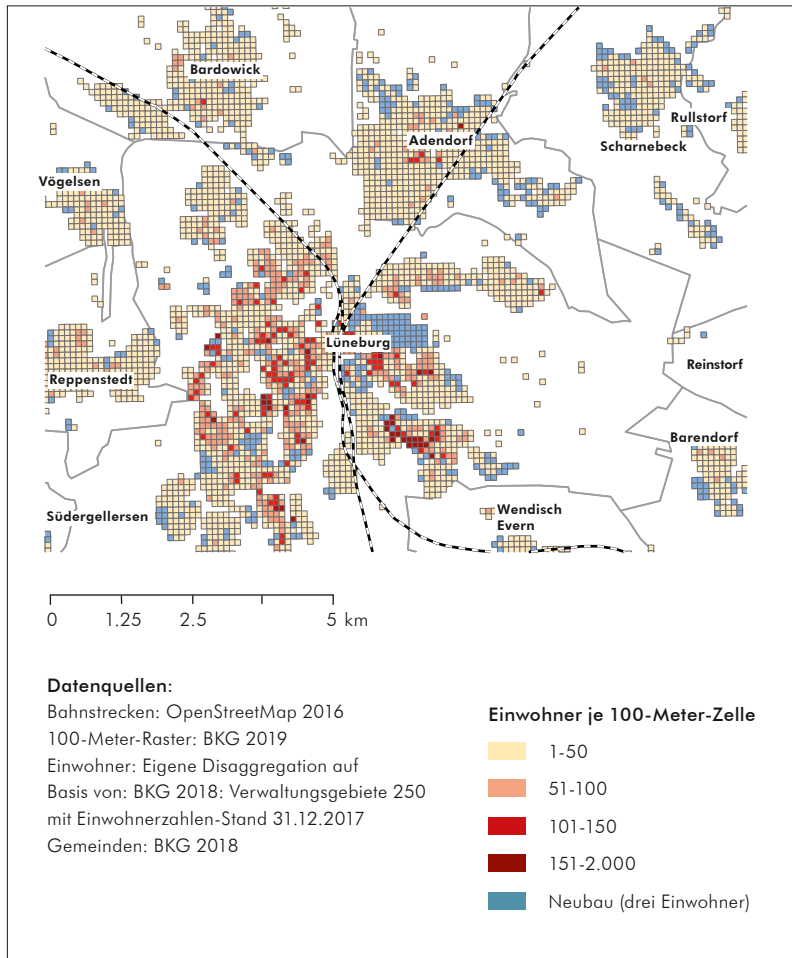
Die Einwohnerverteilung des bewohnten 100-Meter-Rasters basiert auf dem Zensus von 2011 und wurde zum Zensusstichtag am 9. Mai 2011 erhoben (Destatis 2015). Die Fortschreibungsdaten des BKG auf Gemeindeebene vom 31.12.2017 dienen der Berücksichtigung der anschließenden demographischen Veränderungen (BKG 2018; Destatis 2015, S. 20ff.). Ihre Verteilung auf die Rasterzellen erfolgt per Randsummenabgleich direkt proportional zur Einwohnerzahl (Spiekermann & Wegener 2000, S. 3). Dieses Verfahren garantiert, dass die Summe der Einwohner auf Rasterebene mit jener der Gemeinden identisch ist. Da gerade in Hamburg und den umliegenden Gemeinden in den vergangenen Jahren eine hohe Bauaktivität stattgefunden hat ist es notwendig, das bewohnte 100-Meter-Raster um zum Stichtag noch nicht bewohnte Flächen zu ergänzen. Bewohnte aber im Zensus noch nicht enthaltene Gebiete basieren auf Flächennutzungsdaten aus OSM. Für diese Gebiete werden 100-Meter-Zellen mit jeweils drei Einwohnern ergänzt. Die Einwohnerzahl auf Gemeindeebene bleibt davon unberührt. Karte 5 zeigt die Verteilung der Einwohner auf Basis des bewohnten 100-Meter-Rasters.

Jede Rasterzelle³⁹, jede Gemeinde und jedes statistische Gebiet enthält einen geometrischen und einen einwohnergewichteten Zentroiden. Ausgehend von einwohnergewichteten Zentroiden ist die durchschnittliche euklidische Distanz zu jedem Einwohner innerhalb einer 100-Meter-Rasterzelle minimal.⁴⁰ Die Einwohnergewichtung soll den Zentroiden eine höhere Repräsentativität gegenüber der Wohnbevölkerung verleihen (Higgs 2004, S. 122; Páez *et al.* 2012, S. 146ff.). Die geometrischen Mittelpunkte weichen um maximal 354 Meter von den Eckpunkten innerhalb einer 500-Meter-Zelle ab (vgl. Abbildung 27). In einer 100-Meter-Zelle beträgt die mittlere Abweichung des Mittelpunktes von allen denkbaren Punkten 38,26 Meter. In einer 500-Meter-Zelle liegt dieser Wert bei 191,3 Metern. Gegenstand der Diskussion in Abschnitt 5.2.2 ist auch, ob sich die Einwohnergewichtung der Zentroide positiv auf die Repräsentativität von Erreichbarkeitswerten auswirkt.

39 Außer für die bewohnten 100-Meter-Zellen, da sie die Einwohnerverteilung repräsentieren und keine höher aufgelösten Einwohnerdaten vorliegen.

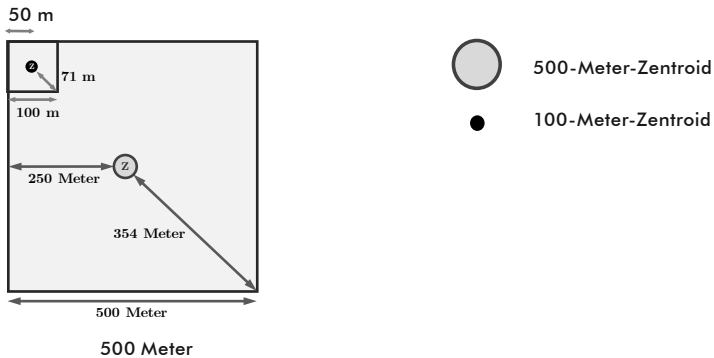
40 Die Berechnung wurde mit dem ArcGIS-Werkzeug ›Mittelwert für Mittelpunkt‹ durchgeführt.

Karte 5: Einwohnerverteilung auf Ebene des 100-Meter-Rasters in Lüneburg



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 27: Distanzen im Rastermodell



Quelle: eigene Darstellung

3.4.2 Strukturdatenbasis, Gelegenheitstypen und Einrichtungen

Das Erreichbarkeitsmodell umfasst eine Strukturdatenbasis mit 24 Gelegenheitstypen und rund 570 Tsd. Einrichtungen (vgl. Tabelle 14). Die Gelegenheiten dienen der Durchführung von Aktivitäten und letztlich auch der Bedürfnisbefriedigung. Beim Aufbau des Modells wird das Ziel verfolgt, möglichst alle Einrichtungen standortgenau abzubilden. Im Gegensatz zu vergleichbaren Untersuchungen wurde auf mehrere Gelegenheitstypen zurückgegriffen, da sich diese hinsichtlich der Menge und der räumlichen Konzentration deutlich unterscheiden. Außerdem zeigen Untersuchungen, dass diese Verteilungsmuster einen Einfluss auf die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen haben (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Die Bundeslandgrenzen überschreitenden Gebietszuschnitte vieler Metropolregionen führen zu besonderen Herausforderungen beim Aufbau der Strukturdatenbasis. Öffentliche Einrichtungen wie Schulen und Krankenhäuser obliegen der Planungshoheit der jeweiligen Bundesländer und auch die Geodateninfrastruktur ist zumeist auf Länderebene organisiert. Das offene Geodatenportal der MRH (MRH o.J.b) ist zwar ein erster Ansatz der Vereinheitlichung von Geodaten, eine zentrale und

Tabelle 14: Strukturdatenbasis des Erreichbarkeitsmodells

Gelegenheitstyp	Raumbezug	Anzahl	Quelle(n)
Arbeitsplätze	Straßenabschnitte	96.247	Nexiga Geodaten GmbH
Bildung		5.052	
Grundschulen	Adressen	969	
weiterführende Schulen	Adressen	612	KGeo, LGV, TUHH, Statistikamt Nord,
Oberstufen	Adressen	366	Landkreis Harburg
Förderschulen	Adressen	178	
Hochschulen	Adressen	23	TUHH
Kindertagesstätten	Adressen	2.904	TUHH, LGV, LSN, KGeo
Gesundheit		7.770	
Hausärzte	Adressen	3.346	
Augenärzte	Adressen	385	Kassenärztliche
Internisten	Adressen	1.467	Vereinigungen
Kinderärzte	Adressen	411	(HH, MV, SH,N)
Orthopäden	Adressen	425	
Apotheken	Adressen	1.634	OSM
Krankenhäuser	Adressen	102	Krankenhauspläne der Länder
Einkauf		9.247	
Supermärkte	Adressen	2.860	OSM, TUHH
aperiodischer Bedarf	Adressen	6.387	OSM TUHH
Freizeit		446.407	
diverse Ziele	Adressen	21.048	OSM
Einwohner	100-Meter-Raster	425.359	Zensus 2011, BKG, TUHH
Verkehrsinfrastruktur		733	
Bahnhöfe	Standorte	676	OSM TUHH
Fernbahnhöfe	Standorte	55	TUHH
Hamburg Hbf.	Standorte	1	TUHH
Hamburg Flughafen	Standorte	1	TUHH
zentrale Orte		159	
Mittelzentren	Punkte	132	LGV, TUHH, FHH
Oberzentren	Punkte	27	LGV, TUHH, FHH
Summe		565.615	

Quelle: eigene Darstellung

vollständige Datenbereitstellung wurde bisher jedoch nicht erreicht. Da die Größe des Untersuchungsgebietes und die Anzahl der berücksichtigten Gelegenheiten zu hohen Anschaffungskosten geführt hätten, sollte bei der Aufbereitung der Strukturdatenbasis weitgehend auf freie bzw. kostenlose Daten zurückgegriffen werden. Dieses Ziel wurde durch die umfassende Verwendung von OSM-Daten erreicht. Die Qualität dieser Daten wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach gezeigt (Neis 2014; Neis *et al.* 2012).

Zur Vermeidung von Kanteneffekten (vgl. Abschnitt 2.2.5) enthält das Standortmodell auch alle relevanten⁴¹ Einrichtungen innerhalb eines Puffers von 20 Kilometern um die MRH (Fransen *et al.* 2015; Vale *et al.* 2016). Bei einem Umwegfaktor von 1,25 und einer Durchschnittsgeschwindigkeit des MIV von 50 km/h entspricht dieser Puffer einer Reisezeit von 30 Minuten. Um alle Fahrtoptionen des MIV innerhalb einer Reisezeit von 60 Minuten abzubilden (u. a. Kumulationsindikatoren mit 60 Minuten Zeitbudget), hätte der Puffer entsprechend auf 40 Kilometer verdoppelt werden müssen. Dies hätte einen um 94,2% höheren Flächeninhalt des Puffers mit weiteren rund 94 Tsd. 500-Meter-Zellen zur Folge. Ein solcher Puffer hätte auch zu einer deutlichen Zunahme der zu berücksichtigenden Einrichtungen geführt, die Rechenzeiten weiter verlängert und den Aufwand zur Erstellung der Strukturdatenbasis erhöht. Bei Modellen auf regionaler Ebene kommt erschwerend hinzu, dass sich die Puffer zumeist auf administrative Einheiten erstrecken, die nicht unmittelbar im Projektkontext adressiert werden können. Der Puffer der MRH reicht beispielsweise in die Bundesländer Brandenburg, Sachsen-Anhalt und in die Freie Hansestadt Bremen. Um die Qualität der Daten zu gewährleisten und systematische also wiederkehrende Fehler zu vermeiden, wurden innerhalb einer Validierungsschleife Anwender aus der Planungspraxis hinzugezogen, um die Qualität der Daten zu prüfen. Die Anwender wurden im Rahmen des Leitprojektes »Regionale Erreichbarkeitsanalysen« der MRH kontaktiert und in die Modellentwicklung eingebunden (vgl. Anmerkungen). Dieses Verfahren ist in regionalen Modellen erforderlich, da den Modellentwicklern das notwendige lokale

41 Dieser Puffer gilt nicht für Schulen, da diese in der Regel im Landkreis des Wohnortes besucht werden.

Wissen fehlt, um die Genauigkeit der Standorte im Gesamtgebiet zuverlässig zu beurteilen. In der MRH wurden u. a. fehlende Außenstellen von Grundschulen und fehlende Supermärkte identifiziert.

Arbeitsplätze

Kleinräumig aufgelöste Arbeitsplatzdaten inklusiver aller Beschäftigungsverhältnisse sind bisher nicht frei verfügbar (Scholz *et al.* 2012). Lediglich die sozialversicherungspflichtig Beschäftigten (SVB) werden auf Gemeindeebene öffentlich vorgehalten. Diese machen etwa 73% aller Beschäftigungsverhältnisse aus, da u. a. Selbstständige, Beamte, geringfügig Beschäftigte und Zeitsoldaten fehlen.⁴²Außerdem werden die SVB jenem Unternehmensstandort zugeordnet, an dem sie registrierter sind. Beispielsweise sind alle Hamburger Edeka Mitarbeiter bei der Zentrale in der City Nord gemeldet. Eine kleinräumige Differenzierung der Arbeitsplatzzahlen wird dadurch erschwert. In unterschiedlichen Projektkontexten zeigt sich immer wieder, dass die kleinräumige Verortung von Arbeitsplätzen auch für die öffentliche Verwaltung von großem Interesse ist (Schwarze 2015, S. 315). Daher werden im Erreichbarkeitsmodell auch kommerzielle Standortdaten verwendet.

Insgesamt umfasst das Modell 3,81 Mio. Arbeitsplätze an 95.199 Straßenabschnitten (Nexiga Geodaten GmbH 2016). Das Verfahren zur Datenaufbereitung wurde aus dem Projekt »€lan –Energiepreisentwicklung und Landnutzung« übernommen (Gertz *et al.* 2015). Die Anzahl der Betriebe auf Straßenabschnittsebene bildet den Ausgangspunkt für die Datenaufbereitung. Diese Daten stammen vom kommerziellen Anbieter Nexiga und wurden im Jahr 2016 erworben. Die Betriebe umfassen drei Größenklassen und sind in 15 Branchen untergliedert. *»Zusätzlich wurde eine Datenbank erstellt, in die alle Arbeitsstandorte aufgenommen wurden, die mindestens 100 Beschäftigte enthalten. Hierzu gehören beispielsweise größere Industrieunternehmen, größere Krankenhäuser und zentrale Verwaltungen. Diese Großbetriebe sind ebenfalls auf Straßenabschnittsebene vorhanden. Um Doppelungen zu vermeiden war es notwendig, beide Datensätze zu vereinheitlichen bzw. die Straßenabschnittsdaten um die*

42 <https://statistik.arbeitsagentur.de/Navigation/Statistik/Statistik-nach-Themen/Beschaeftigung/Beschaeftigung-Nav.html> und https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/_inhalt.html (letzter Zugriff: 05.10.2019)

Großbetriebe zu reduzieren. Auf diese Weise wurde ein Zählen der Betriebe sowohl auf Basis der Straßenabschnitte als auch auf Basis der Großbetriebe vermieden. Anschließend wurden den einzelnen Unternehmen auf Ebene der Straßenabschnitte konkrete Arbeitsplatzzahlen zugeordnet, die in der Summe den sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der jeweiligen Gemeinde entsprechen (abzüglich der Beschäftigten in den Großbetrieben). In Abhängigkeit von der Branche und der Größenklasse jedes Unternehmens wurden weitere Beschäftigte hinzugefügt, um auch nicht sozialversicherungspflichtige Beschäftigungsverhältnisse zu berücksichtigen« (Peter & Gertz 2017, S. 32, 33).

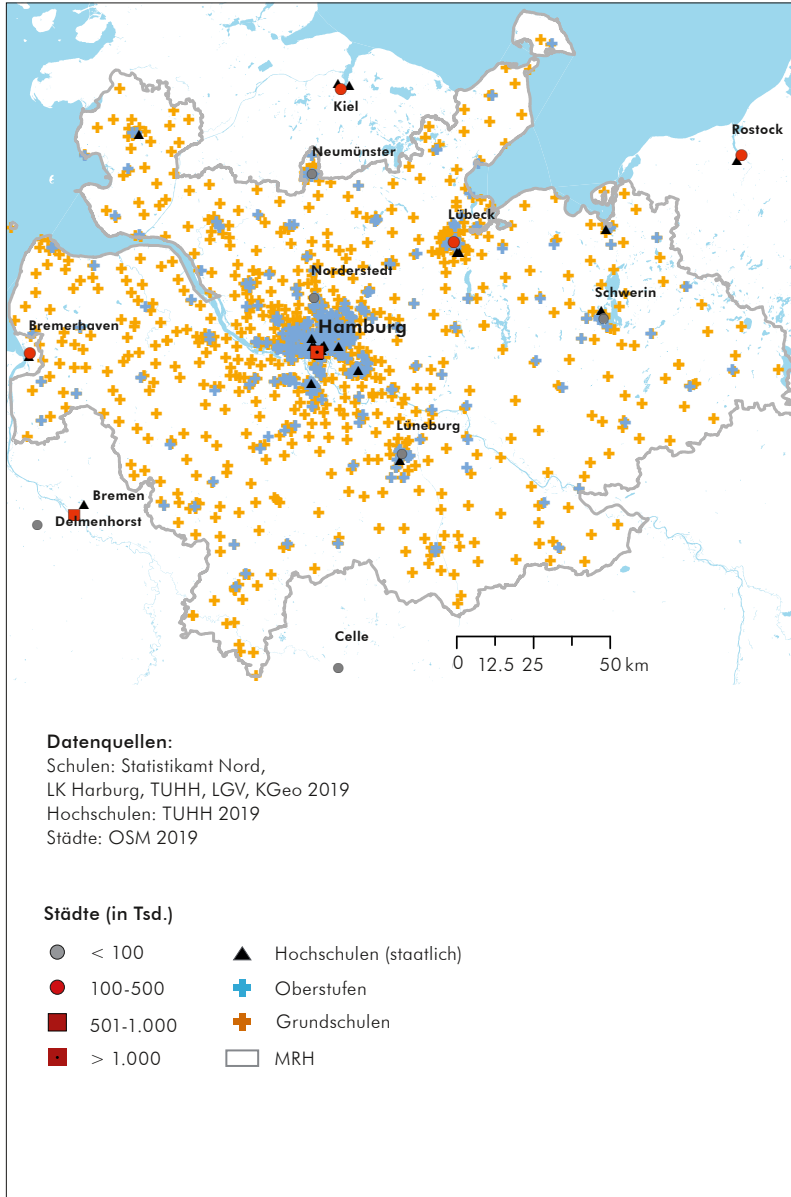
Bildungseinrichtungen

Im Erreichbarkeitsmodell werden nur Schulen berücksichtigt, die sich innerhalb der MRH befinden. Es ist üblicherweise nicht davon auszugehen, dass der Schulstandort von in der MRH wohnenden Schülern in einem Nachbarlandkreis oder Nachbarbundesland liegt.⁴³ Gleichwohl ist es in Schleswig-Holstein möglich, die Schule im Wohnkreis frei zu wählen. In Niedersachsen sind die Grundschulen hingegen an Schulbezirke gebunden.⁴⁴ Folglich ist es bei der Berechnung der Erreichbarkeitsindikatoren notwendig, die Grundschulen im Schulbezirk der Wohnzelle zu berücksichtigen. Die Schulen werden in Grund- und weiterführende Schulen sowie Oberstufen und Förderschulen unterteilt. Weiterführende Schulen ermöglichen das Ablegen der mittleren Reife und Oberstufen des Abiturs. Die Klassifizierung der Schulformen ist in den Bundesländern jedoch unterschiedlich und die Systematik schafft hier eine Vereinheitlichung. Viele Schulstandorte bieten die Möglichkeit eines Schulbesuchs von der ersten Klasse bis zum Abitur. Diese Standorte werden entsprechend bei

43 Beispiel Schleswig-Holstein: »Zuständig ist eine Schule des Schulträgers, in dessen Gebiet die zum Schulbesuch verpflichteten Kinder und Jugendlichen ihre Wohnung haben.« § 24 Abs. 2 SchulG iVm. »Die Gemeinden sind die Träger der allgemein bildenden Schulen.« § 53 SchulG

44 »Im Primarbereich legen die Schulträger für jede Schule einen Schulbezirk fest; im Sekundarbereich I können sie für Schulen, erforderlichenfalls für einzelne Bildungsgänge, Schulzweige oder einzelne Schuljahrgänge gesondert, einen Schulbezirk festlegen.« § 63 Abs. 2 NSchG und § 102 Abs. 1 u. 2 NSchG: »Schulträger der Grundschulen sind die Gemeinden und Samtgemeinde, der weiteren Schulen die Landkreise und kreisfreien Städte.«

Karte 6: Bildungseinrichtungen (Auswahl) in der Metropolregion Hamburg



Quelle: eigene Darstellung

allen Schulformen berücksichtigt. Aufgrund mehrerer dutzend unterschiedlicher Schulformen, war häufig eine händische Zuweisung nötig.

In den offiziellen Daten der Bildungsministerien fehlen mitunter die Außenstellen im Primarbereich. Diese Standorte konnten innerhalb der Validierungsschleife identifiziert und Fehler bei der Erreichbarkeitsberechnung vermieden werden. Waldorfschulen bzw. freie Schulen sind im Erreichbarkeitsmodell nicht enthalten, da sie aufgrund der Schulgeldpflicht einen Sonderzweig darstellen. Ihr Einfluss auf die Erreichbarkeit ist zudem überschaubar, da sie in der Regel in Gebieten mit einem ohnehin umfangreichen Schulangebot liegen. Karte 6 zeigt alle 969 Grundschulen und die 366 Einrichtungen mit einer Oberstufe in der MRH. Grundschulen sind wesentlich häufiger vertreten und gleichmäßiger im Raum verteilt. Die Oberstufenstandorte befinden sich in der Regel in zentralen Orten oder zumindest herausgehobenen Siedlungsschwerpunkten. Hinzu kommen 23 Hochschulstandorte in öffentlicher Trägerschaft. Alle größeren Standorte der Universität Hamburg werden im Modell berücksichtigt. Zu diesen gehören beispielsweise das Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf und das Geomatikum. Zwischen diesen Einzelstandorten liegen teilweise Distanzen von mehreren Kilometern.

Die Strukturdatenbasis umfasst außerdem 2.904 Kindertagesstätten. Diese wurden von den Aufgabenträgern zugeliefert und besitzen keine einheitliche Aktualität. Dies führt dazu, dass die niedersächsischen Standorte⁴⁵ bei einem Alter von fünf Jahren erhebliche Lücken aufweisen können, die Standorte in Schleswig-Holstein⁴⁶ hingegen aktuell und vollständig sind. Öffentlich zugänglich sind lediglich die Adressen der Standorte in Mecklenburg-Vorpommern⁴⁷ und Neumünster.

45 Diese werden vom Landesamt für Statistik Niedersachsen (LSN) bereitgestellt.

46 Die Daten stammen aus den Kreisen Steinburg und Herzogtum Lauenburg, der kreisfreien Stadt Neumünster sowie von Dataport im Auftrag des Landes Schleswig-Holstein.

47 Über das Geoportal Mecklenburg-Vorpommern: <https://www.geoportal-mv.de/portal/> (letzter Zugriff: 10.04.2019)

Gesundheitseinrichtungen

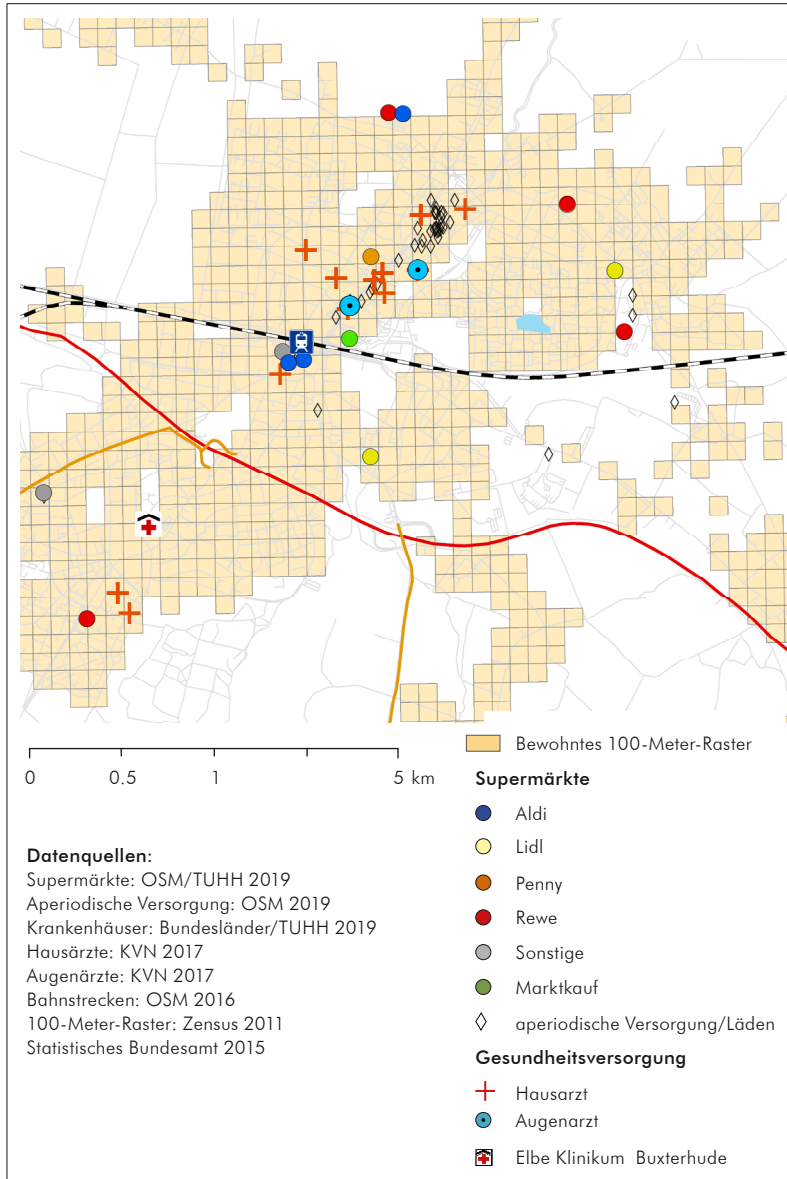
Als die wesentlichen Einrichtungen der medizinischen (Grund-)Versorgung werden Hausärzte, Apotheken und Krankenhäuser im Modell berücksichtigt. Hinzu kommen Augenärzte, Kinderärzte, Internisten und Orthopäden aus dem Bereich der fachärztlichen Versorgung. Die OSMCommunity erstellte im Jahr 2015 einen weitgehend vollständigen Datensatz der Apothekenstandorte zur einfachen Verwendung.⁴⁸ Demnach ist von einer hohen Datenqualität auszugehen, zumal auch die Apothekenstandorte einer zusätzlichen Validierung unterzogen wurden. Andere Projekte zeigen außerdem, dass auch kommerzielle Standortdaten der Apotheken Ungenauigkeiten aufweisen (Neumeier 2017, S. 23). Der validierte Datensatz umfasst 1.634 Apotheken in der MRH und den angrenzenden Gebieten.

Deutlich aufwendiger ist die Erfassung der Haus- und Fachärzte. Die hausarztzentrierte Versorgung besagt, dass Hausärzte die erste Anlaufstelle für Patienten bei der ärztlichen Versorgung sein sollen (§ 73b SGB V). Aufgrund ihrer Lotsenfunktion besitzen sie eine herausgehobene Bedeutung innerhalb der medizinischen Grundversorgung. Üblicherweise wird bei der Beschaffung von Arztdaten auf die Kassenärztlichen Vereinigungen (KV) der Bundesländer (Wieland & Dittrich 2016, S. 36; Schwarze 2015, S. 203) sowie Daten der Landkreise (Friedrich *et al.* 2016, S. 11) zurückgegriffen. Die Daten der KVen beinhalten keine Haus- und Fachärzte, die die zentrale Erfassung und Weitergabe ihres Standortes ablehnten. Mit Hilfe dieser Daten wurden ferner die Standorte von ausgewählten Facharztgruppen ermittelt. Diese beinhalten Augenärzte, Internisten, Kinderärzte und Orthopäden.⁴⁹ Aufgrund der aufwendigen Beschaffung und Aufbereitung der Daten werden keine Standorte in Brandenburg und Sachsen-Anhalt berücksichtigt. Die Bedeutung dieser für die in Grenznähe wohnende Bevölkerung wird zudem als vernachlässigbar angesehen. Insgesamt umfasst der Datensatz u. a. 3.346 Hausärzte und 385 Augenärzte (vgl. Karte 7).

48 <http://blog.openstreetmap.de/blog/2015/01/wochenaufgabe-kw-0607-apotheken/> (letzter Zugriff: 10.04.2019)

49 Diese Arbeit beschränkt sich auf vier Facharztgruppen, da die Verteilungsmuster für alle Facharztgruppen als vergleichbar angenommen werden.

Karte 7: Gesundheits- und Versorgungseinrichtungen (Auswahl) in Buxtehude



Quelle: eigene Darstellung

In Deutschland sind die Krankenhäuser unterschiedlichen Versorgungsstufen zugeteilt (BMVBS 2010d, S. 13). Das Erreichbarkeitsmodell beinhaltet 102 Standorte der Schwerpunkt-, Maximal- und Regelversorgung. Die Standorte entstammen den jeweils aktuellen Krankenhausplänen der Bundesländer. Die Verortung erfolgte händisch auf Basis von OSM. Auch Krankenhäuser im Umkreis von 20 Kilometern um die MRH sind im Modell enthalten.

Einkauf

Die Versorgung von Haushalten wird in den periodischen und aperiodischen Bedarf unterteilt. Der periodische Bedarf umfasst ein Warenangebot mit einem regelmäßigen und kurzen Beschaffungsrhythmus. Dazu gehören Nahrungs- und Genussmittel, Pflegeartikel sowie Zeitschriften. Die Realisierung der Nachfrage erfolgt zumeist bei den Vollsortimentern (breites Angebot) oder Discountern (mittleres Angebot) (FGSV 2014, S. 20). Die Standorte basieren ausschließlich auf OSM, da kommerzielle Daten hohe Beschaffungskosten erzeugen und auf Vollerhebungen nicht flächendeckend zurückgegriffen werden kann. Der Datensatz Supermärkte umfasst alle in OSM als ›*supermarket*‹ getaggtten Standorte. Anschließend wurden diese um die nicht relevanten Einrichtungen reduziert. Hierzu gehören beispielsweise Kioske, Zoohandlungen und nicht bestimmbare Einrichtungen. Eine zusätzliche Validierung erfolgte mit Hilfe einer weiteren Internetrecherche. So war es u. a. möglich, nicht als Edeka gekennzeichnete Standorte zu identifizieren und das Warenangebot inhabergeführter Läden abzuschätzen. Der Datensatz mit den Supermärkten umfasst 2.860 Standorte zur Deckung des periodischen Bedarfs.

Dem aperiodischen Bedarf sind Warengruppen mit einem mittel- bis langfristigen Beschaffungsrhythmus zugeordnet. Zu den relevanten Versorgungseinrichtungen gehören beispielsweise Buchläden, Baumärkte, Bekleidungsgeschäfte und Spielzeuggläden. Die Möglichkeit zur Bedarfsdeckung wird über Kumulations- und Potenzialindikatoren quantifiziert (vgl. Abschnitt 3.6). Mit diesen Indikatoren wird die Anzahl der erreichbaren aperiodischen Versorgungseinrichtungen innerhalb eines vordefinierten Zeitbudgets ermittelt. Es wird unterstellt, dass die Menge der angebotenen Warengruppen mit der Anzahl der erreichbaren Läden steigt und somit eine größere Auswahl tatsächlich zur Verfügung steht.

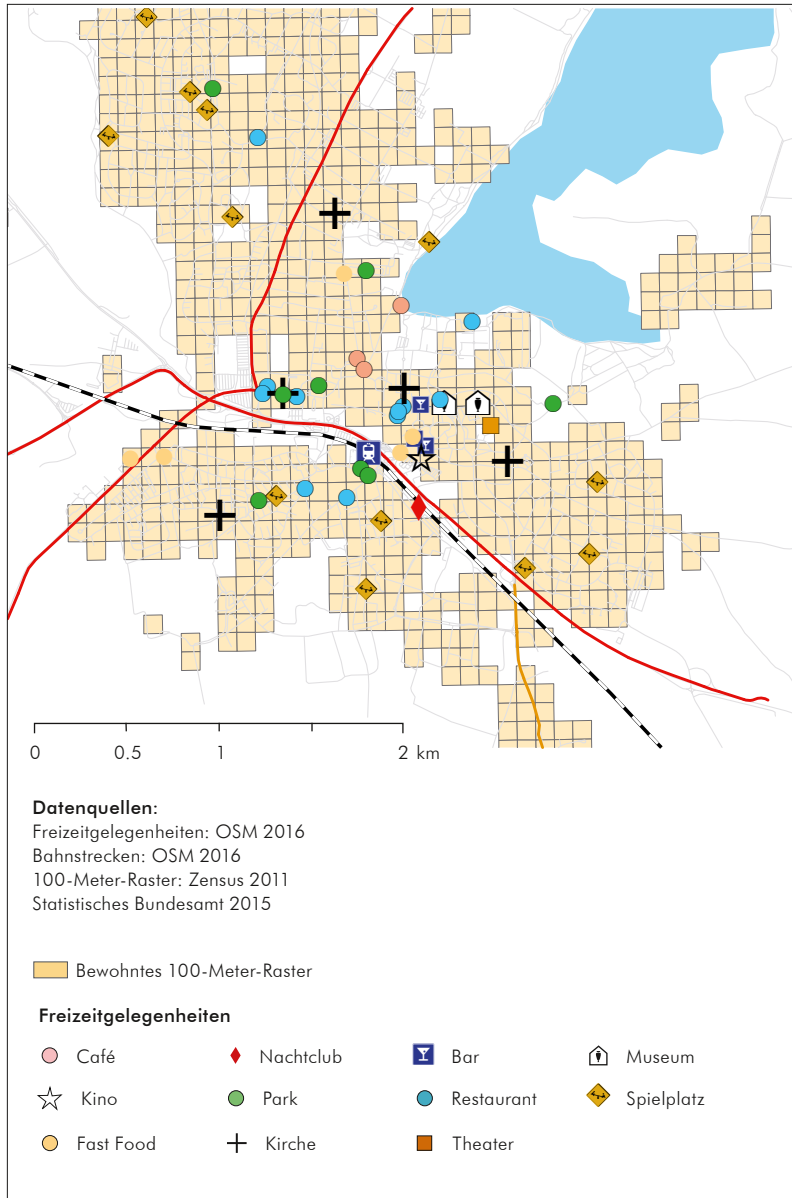
Anders als die Supermärkte, sind die Versorgungseinrichtungen des aperiodischen Bedarfs häufig nicht substituierbar. Die Nachfrage nach Büchern, Kleidung oder Werkzeugen kann nur in den entsprechenden Einrichtungen befriedigt werden. Wenn hingegen der tägliche Bedarf gedeckt wird, ist es, von einigen Ausnahmen abgesehen, unerheblich, ob dies bei Aldi, Penny oder Rewe geschieht. Die Standorte der aperiodischen Versorgung stammen ebenfalls aus OSM. Diese enthalten u. a. Bekleidungs- und Blumengeschäfte, Baumärkte und Optiker. Eine vollständige Abbildung des Versorgungsangebotes konnte aufgrund der Unterschiedlichkeit und der Menge der einzelnen Standorte nicht erzielt werden. Auch die Gewichtung der einzelnen Einrichtungen unterblieb. Gleichwohl wird die räumliche Struktur des Angebotes mit einer starken Konzentration sehr gut wiedergegeben (vgl. Karte 7). Der 20-Kilometer-Puffer wurde beim Aufbau der Datenbasis berücksichtigt.

Freizeit

Gegenwärtig werden 34% aller Kilometer für Freizeitwecke zurückgelegt. Kein anderer Sektor erzeugt Verkehr in diesem Umfang (infas *et al.* 2018a, S. 19). Trotz der hohen Bedeutung spielen Freizeitverkehre in Erreichbarkeitsuntersuchungen bisher nur eine untergeordnete Rolle. Zu den Ausnahmen gehören die Analysen der Erreichbarkeit von öffentlichen Bibliotheken in Helsinki (FIN) und von Kinos, Parks, Restaurants und Stränden in der Region Auckland (NZ) (Mavoa *et al.* 2012; Salonen & Toivonen 2013). Besuche sind ebenfalls Freizeitverkehre und werden mitunter über das Zielpotenzial Einwohner in Erreichbarkeitsmodelle integriert (Fayyaz & Liu 2016; Stępniaik & Goliszek 2017).

Freizeitwegen können unter anderem Restaurants, Kinos, Fitnesscenter, Grünanlagen, Schwimmhallen und Einwohner (für Besuche) als mögliche Zielpotenziale zugeordnet werden. Auch Rundwege bzw. »Wege ohne Ziel« werden als Freizeitwege klassifiziert (Zumkeller *et al.* 2010, S. 50). Die Strukturdatenbasis beinhaltet 21.084 Gelegenheiten für unterschiedliche Freizeitaktivitäten und 425.359 bewohnte 100-Meter-Rasterzellen (inklusive 20-Kilometer-Puffer). Mit dieser Datenbasis lässt sich das räumliche Bedeutungsgefälle hinsichtlich der Anzahl an Freizeitgelegenheiten abbilden.

Karte 8: Freizeitgelegenheiten (Auswahl) in Bad Segeberg



Quelle: eigene Darstellung

Die Freizeitgelegenheiten wurden auf Grundlage von OSM ermittelt, die Einwohner entstammen dem bewohnten 100-Meter-Raster (vgl. Abschnitt 3.4.1). Karte 8 zeigt den in Bad Segeberg vorhandenen Modellbestand an Freizeiteinrichtungen. Sowohl die Freizeiteinrichtungen als auch die bewohnten 100-Meter-Zellen werden nur für die Berechnung von Kumulations- und Potenzialindikatoren verwendet (vgl. Abschnitt 3.6). Eine Berechnung von Reiseaufwandsindikatoren erfolgt nicht, da die einzelnen Ziele nur innerhalb einer Kategorie substituierbar sind, eine weitergehende Differenzierung hätte aber einen hohen Berechnungsaufwand zur Folge.

Verkehrsinfrastruktur

Die Erreichbarkeit von Verkehrsknoten wird über Bahnhöfe, Fernbahnhöfe, den Hamburger Hauptbahnhof und den Hamburger Flughafen abgebildet (vgl. Karte 3). Diese Wege werden auch der Erschließungsqualität (VDV 2019, S. 15) zugerechnet und über die system accessibility bewertet (Lei & Church 2010, S. 284). Die Standorte von Bahnhöfen und Haltestellen sind Bestandteil der elektronischen Fahrplandaten (vgl. Abschnitt 3.5.1). Diese geben Aufschluss darüber, welche Verkehrsmittel und in welcher Häufigkeit die einzelnen Haltestellen anfahren.

Eine darauf aufbauende Differenzierung und Attributierung der Haltestellen ist also möglich.

Im Verkehrsgraphen besitzen Busse, Fähren, S-Bahnen, U-Bahnen, Fern- und Regionalbahnen getrennte Zugangsknoten in Form von Haltestellenbereichen. So ist es möglich, Umsteigebeziehungen korrekt abzubilden und die Zugangsknoten zu jedem einzelnen Verkehrssystem genau zu bestimmen. An großen Umsteigeknoten wurden für die einzelnen Verkehrssysteme mitunter mehrere Haltestellenbereiche erstellt (vgl. Abschnitt 3.5.1). Beispielsweise umfasst der Hamburger Hauptbahnhof elf Haltestellenbereiche, davon zwei im U-Bahnverkehr (U1+U3 und U2+U4). Im Modell sind alle in der MRH startenden und endenden Linien inklusiver aller Haltestellen berücksichtigt. In Schleswig-Holstein und Niedersachsen wird zudem innerhalb des Puffers von 20 Kilometern das vollständige Fahrplanangebot abgebildet.

Zentrale Orte

Zentrale Orte können keiner Adresse zugeordnet werden, da sie die zusammengefasste Lagegunst von Standorten aufgrund des Vorhandenseins zentraler Einrichtungen repräsentieren. Häufig werden die Marktplätze oder die Mittelpunkte bedeutender Einkaufsstraßen als Referenz verwendet. Die genaue Lage muss gegenüber den zentralen Einrichtungen und ÖV-Haltestellen verallgemeinerbar sein. Lagefehler von wenigen 100 Metern können im ÖV bereits zu einer erheblichen Reduzierung der Erreichbarkeit führen, wenn dadurch zusätzliche Umstiege erforderlich sind.

Im Erreichbarkeitsmodell sind nur Mittel- und Oberzentren als einzige in Deutschland verallgemeinerbare Zentralitätsstufen enthalten. Karte 2 zeigt ihre räumliche Verteilung. Wenige Standorte liegen relativ gleichmäßig im Gebiet der MRH verteilt. Die Hamburger Standorte wurden auf Basis des städtischen Zentrumsystems ergänzt (FHH 2014). Demnach wird die Hamburger City als A-Zentrum deklariert. Die nächste Zentralitätsstufe bilden die B₁-Zentren (Bezirkszentren), welche ein Warenangebot des mittel- und langfristigen Bedarfs bereitstellen und mitunter oberzentrale Versorgungsfunktionen übernehmen (Harburg und Bergedorf) (ebd., S. 8). Da die übrigen B₁-Zentren eine Erweiterung der inneren Stadt darstellen und eine Abgrenzung insofern nicht immer gegeben ist, werden sie insgesamt als Oberzentren berücksichtigt. Auch die B₂-Zentren (Bezirksentlastungszentren) bieten ein Warenangebot, welches der mittel- und langfristigen Versorgung dient. Gleichwohl liegt hier der Schwerpunkt auf dem großflächigen Einzelhandel (ebd., S. 8). Im Modell der Raumstruktur werden sie als Mittelzentren einbezogen.

3.5 Aufbau der Verkehrsgraphen

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der Verkehrsgraphen des multimodalen Erreichbarkeitsmodells vorgestellt. Da das Modell in der Lage sein soll die Raumwiderstände von Tür-zu-Tür präzise abzubilden, ist eine hohe Detaillierung der Verkehrsgraphen unumgänglich (vgl. Abschnitt 2.3). Wichtig ist außerdem, dass die Graphen für die unterschiedlichen Verkehrsmodi eine konsistente Detaillierung aufweisen, da andernfalls kein zuverlässiger Reisezeitvergleich möglich ist (Salonen & Toivonen 2013, S. 152).

3.5.1 Öffentlicher Personenverkehr

Die Berechnung der Raumwiderstände im öffentlichen Verkehrssystem erfolgt von Tür-zu-Tür (vgl. auch Abbildung 24). Die Beschaffung und Validierung der Fahrplandaten, die Erstellung des ÖV-Graphen und die Entwicklung eines performanten Berechnungsverfahrens sind in der regionalen und bundeslandübergreifenden Gebietskulisse der MRH eine besondere Herausforderung. In der Literaturanalyse zur ÖV-Modellierung wurden unterschiedliche Herangehensweisen identifiziert und beim Aufbau des ÖV-Verkehrsgraphen berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Datengrundlagen

Das Modell des öffentlichen Verkehrssystems beinhaltet alle Linien und Fahrplanfahrten der Fahrplanperiode 2019. Der Referenztag ist der 19.02.2019, ein normaler Dienstag außerhalb der Ferien und nicht am Ende eines langen Wochenendes. Die genutzten Datenquellen machen es möglich, einen Großteil des Grenzgebietes innerhalb eines Puffers von 20 Kilometern vollständig in das ÖV-Modell zu integrieren. Zu diesen gehören Teilbereiche der Bundesländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Bremen sowie der Landkreis Rostock und die Hansestadt Rostock. Das ÖV-Modell ist hierarchisch aufgebaut und beinhaltet Haltestellen und Haltestellenbereiche sowie Linien, Linienroutenverläufe und Fahrplanfahrten (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 15: Elemente des ÖV-Verkehrsgraphen

Elemente	Anzahl
Linien	2.803
Linienrouten	24.895
Fahrplanfahrten	313.883
Haltestellen	25.263
Haltestellenbereiche	29.615
Σ	371.564

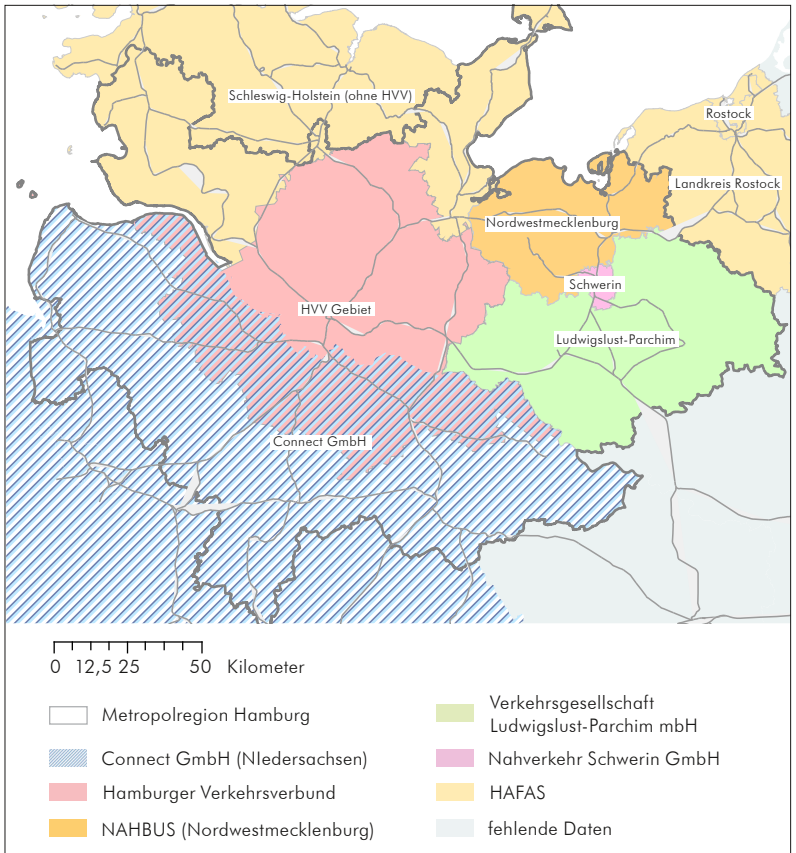
Quelle: eigene Darstellung

Es werden alle Fahrten des Jahresfahrplans 2019 im Modell berücksichtigt. Vorhandene Fahrplandaten der flexiblen Angebote sind ebenfalls im Modell enthalten. Auf den Strecken von Rostock über Schwerin nach Hamburg (Einzelfahrten der ICE-/IC-Linien 10, 26, 30) sowie von Berlin über Ludwigslust und Büchen nach Hamburg (insbesondere EC-Linie 27) wurde, nach Abstimmung mit den Praxispartnern, außerdem der Fernverkehr integriert, da dieser für die örtliche Bevölkerung von herausragender Bedeutung ist und insbesondere die Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen gewährleistet. Eine Beeinflussung der in Kapitel fünf durchgeführten Analysen kann ausgeschlossen werden, da nur wenige Relationen betroffen sind.

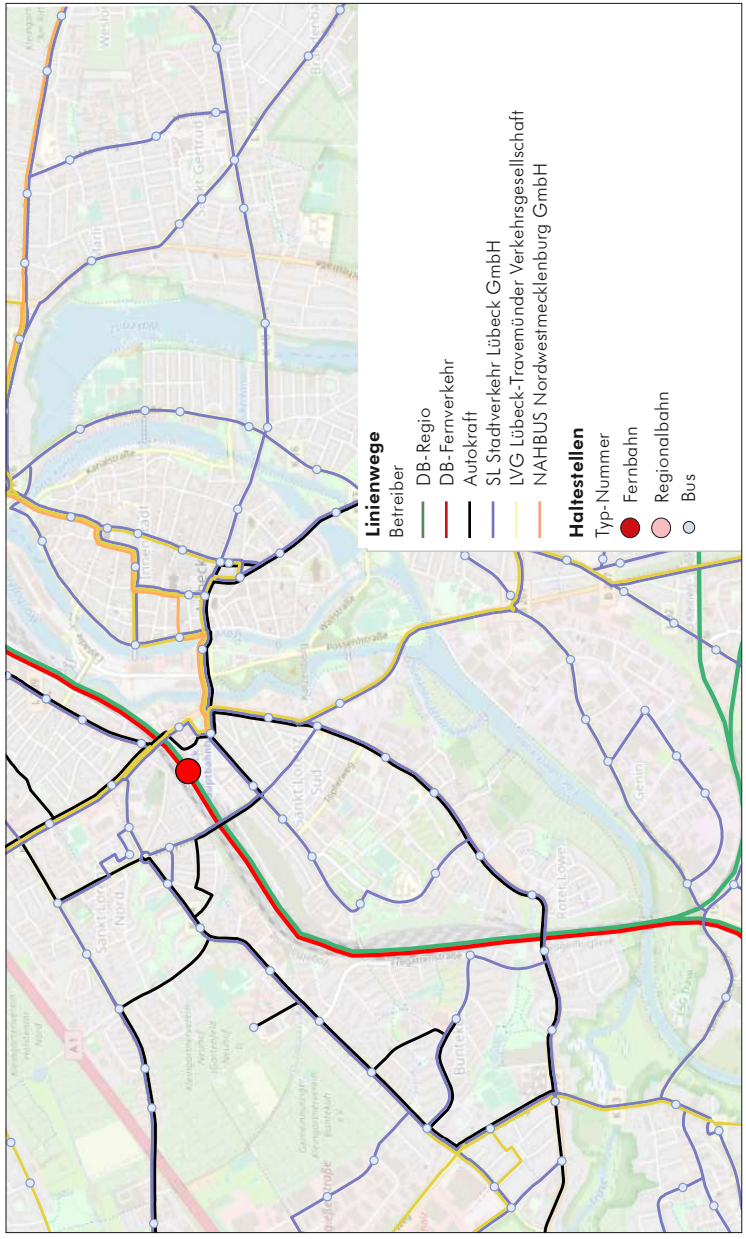
Die MRH umfasst vier Bundesländer, die jeweils die Aufgabenträgerschaft für den SPNV (Schienenpersonennahverkehr) übernehmen. Hinzu kommen 21 Landkreise und kreisfreie Städte als Träger des öffentlichen Straßenpersonennahverkehrs (ÖSPV). Zwar haben sich neun dieser Gebiete zum Hamburger Verkehrsverbund (HVV) zusammengeschlossen, gleichwohl bleibt eine auch für Metropolregionen untypische Zersplitterung der Aufgabenträgerschaft erhalten. Da die Aufgabenträger in der Regel für die Bereitstellung von Fahrplandaten zuständig sind, ergibt sich ein hoher zeitlicher Aufwand bei der Erstellung des ÖV-Verkehrsgraphen (Spiekermann & Schwarze 2014, S. 65) (vgl. Abschnitt 2.3.3.4). Erreichbarkeitsmodelle auf regionaler Ebene umfassen zumeist Gebietskulissen, für die Fahrplandaten aus einer Quelle bereitgestellt werden (Wulforth *et al.* 2010; Schwarze 2015). Die in dieser Arbeit verwendeten Fahrplandaten stammen hingegen aus sechs unterschiedlichen Datenquellen (vgl. Karte 9). Die Fahrplandaten des HVV und der Connect GmbH (Niedersachsen) können nach einer einfachen Registrierung frei heruntergeladen werden. Die Fahrplandaten der Landkreise Nordwestmecklenburg und Ludwigslust-Parchim sowie der kreisfreien Stadt Schwerin wurden im Projektkontext bereitgestellt. Die Fahrplandaten der übrigen Gebiete in Schleswig-Holstein sowie in Teilen Mecklenburg-Vorpommerns (Rostock und Landkreis Rostock) wurden direkt aus HAFAS ausgelesen. Für die übrigen Randgebiete in Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt waren keine Fahrplandaten verfügbar.

Einen hohen Arbeitsaufwand erzeugt das Zusammenführen von Fahrplandaten aus unterschiedlichen Quellen, da eigentlich identische Haltestellen zumeist weder eine identische Nummerierung noch einen identischen Namen aufweisen. Bleiben separate Haltestellen bestehen, ist ein Umstieg zwischen diesen, beispielsweise an Kreisgrenzen, nicht möglich. Händische Nachbearbeitungen sind also notwendig, um die Verknüpfung des Liniennetzes an den Haltestellen zu gewährleisten. Mitunter sind zudem einzelne Linien in mehreren Fahrplanquellen vorhanden. Auch hier ist die Entfernung von Duplikaten aufgrund der nicht

Karte 9: Fahrplandaten und Datenquellen



Karte 10: Detaillierung des ÖV-Verkehrsgraphen am Beispiel vom Lübeck



Quelle: eigene Darstellung, Oktober 2019

immer eindeutigen Benennung aufwendig. Es zeigt sich, dass das Fehlen eines Verkehrsverbundes für die gesamte MRH oder zumindest einer Initiative zur Bereitstellung von Fahrplandaten den Aufbau, die Praxisintegration und die Verstetigung eines ÖV-Modells wesentlich erschwert.

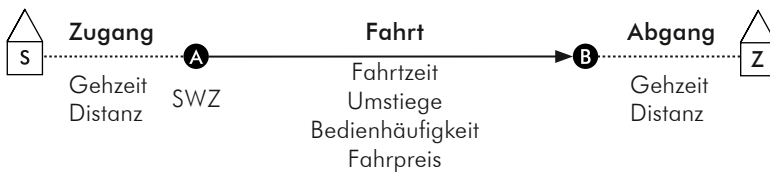
Karte 10 zeigt einen Ausschnitt des erzeugten ÖV-Verkehrsgraphen inklusive dem Haltestellennetz und den Betreibern der einzelnen Bus- und Bahnlinien. Die Abbildung entstand auf Basis des ÖV-Angebotes zur Fahrplanperiode 2017, da die Umlegung der Linienverläufe auf das Straßennetz in der aktuellen Version unterblieb. Die Berechnung von Fahrtweiten und die topologisierte Darstellung des Liniennetzes sind in der aktuellen Version daher nicht mehr möglich. Gleichzeitig wurde der Arbeitsaufwand bei der Modellerstellung deutlich reduziert.

Raumwiderstände und Routingverfahren

Unter Berücksichtigung der Fahrplandaten wurde ein intermodaler und fahrplanfeiner Verkehrsgraph aufgebaut, der die tageszeitgenaue Berechnung von Raumwiderständen auf Wegen von Tür-zu-Tür ermöglicht (vgl. Abschnitt 2.3.1). Abbildung 28 zeigt die wesentlichen Raumwiderstände auf ÖV-Wegen. Ziel des kleinräumigen Erreichbarkeitsmodells ist die Berechnung dieser Raumwiderstände auf reisezeitminimierenden Verbindungen.

Um die schnellsten Verbindungen zu ermitteln, werden alle Rasterzellen und Gelegenheiten an die nächsten sechs Bus- und drei Bahnhaltestellen angebunden. Die Anbindung der Rasterzellen und Gelegenheiten auf dem NMIV-Verkehrsgraphen erfolgt mit dem ArcGIS NA. Die Anbindungen werden anschließend in einer HDF5-Tabelle gespeichert (vgl. Abschnitt 3.3). In Abhängigkeit von der Bedienhäufigkeit auf einer Relation

Abbildung 28: Raumwiderstände auf Wegen im öffentlichen Verkehr



Quelle: eigene Darstellung

wird an der Starthaltestelle außerdem die SWZ als unvermeidbarer Bestandteil eines ÖV-Weges addiert. Zwischen den Haltestellen erfolgt die Widerstandsberechnung mit der Software PTV Visum über Haltestellenbereichsmatrizen für jedes Zeitintervall (Weiss *et al.* 2018, S. 237). Die Speicherung der Matrizen erfolgt wiederum in der HDF5-Datenbank. Anschließend werden die einzelnen Tabellen kombiniert, um zwischen den Start- und Zielpunkten die Raumwiderstände auf schnellsten Verbindungen zu ermitteln. Gerade in Innenstädten können auf kurzen Wegen mitunter schnellere Gehzeiten realisiert werden. Solche Direktwege werden berücksichtigt, wenn sie schneller sind als Wege im ÖV und 20 Minuten nicht überschreiten (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Parameter für die Widerstandsberechnung im ÖV

Parameter	Wert
<i>Raumwiderstände</i>	
Fahrplantage	19.02.2019 (normaler Dienstag)
Zeitintervall (Arbeit, Bildung, Kita)	06:00 – 08:00
Zeitintervall (Sonstige)	09:00 – 12:00
Nachlauf 2h	2h
Routingverfahren	fahrplanfein
Fahrtzeit	20%-Quantil (nach minimaler Fahrtzeit)
Umsteigehäufigkeit	20%-Quantil (nach minimalen Umstiegen)
Direktweg zu Fuß	$t_{\text{Gehzeit}} \leq 20 < t_{\text{ÖV}}$
<i>Anbindung der Haltestellen</i>	
maximale Anbindungszeit	20 Minuten
Anzahl an Haltestellen (Bus / Bahn)	6 / 3
Gehgeschwindigkeit	routenabhängig; ~4 km/h
<i>Startwartezeit</i>	
Bedienhäufigkeit	fahrplanfein auf Start-Ziel-Relationen im Zeitintervall
Takt	Stunden im Zeitintervall/Bedienhäufigkeit
SWZ	$0,53 * \text{Takt}^{0,75}$

Bei der Suche nach besten Verbindungen zwischen Haltestellen ist fraglich, was eine beste Verbindung charakterisiert und welche Fahrtoption in einem Zeitfenster als maßgeblich gelten (vgl. Abschnitt 3.5.1). Beispielsweise wird von der FGSV eine empfundene Beförderungszeit vorgeschlagen, die Umstiege im Regional- und Fernverkehr mit zusätzlichen 10 Minuten bestraft (2008, S. 46). Im Erreichbarkeitsmodell werden keine generalisierten Kosten zur Bestrafung einzelner Raumwiderstände verwendet, da nur messbare Reisezeiten relevant sind und der Vergleich mit dem Individualverkehr, der ebenfalls keine generalisierten Kosten aufweist, zu gewährleisten ist. Außerdem können empfundene Reisezeiten von Praxisanwendern falsch interpretiert werden, da sie weder aus einem Fahrplan abzulesen sind, noch mit persönlichen Erfahrungen korrespondieren. Insbesondere dann, wenn sie als Minutenwert und nicht als dimensionslose Einheit verstanden werden.

Das Erreichbarkeitsmodell ermittelt die besten Wege im öffentlichen Verkehr für die Hauptverkehrszeit (HVZ) von 06 Uhr bis 08 Uhr und die Nebenverkehrszeit von 09 Uhr bis 12 Uhr. Die Verwendung von zwei sich jeweils auf einen normalen Dienstag (19.02.2019) beziehenden Zeitfenstern ist lediglich ein Kompromiss. Gerade im Freizeitverkehr werden viele Wege am Wochenende und innerhalb der Schwachlastzeiten zurückgelegt. Gleichwohl würde die Verwendung zusätzlicher Zeitfenster einen erheblichen Mehraufwand bedeuten, da allein die Berechnung einer Haltestellenbereichsmatrix etwa fünf Stunden benötigt. Es ist aber gewährleistet, dass Bildungseinrichtungen im Schulbusverkehr und Arbeitsplätze während der morgendlichen HVZ erreichbar sind. Die übrigen Gelegenheiten im Modell werden hingegen zumeist außerhalb der HVZ aufgesucht. Dies gilt insbesondere für medizinische Versorgungs- und Freizeiteinrichtungen. Beide Zeitintervalle beziehen sich auf die Abfahrtszeit an der Starthaltestelle und werden um einen Nachlauf von zwei Stunden erweitert. Für die HVZ bedeutet dies, dass alle Verbindungen berücksichtigt werden, die zwischen 06 Uhr und 08 Uhr starten und spätestens um 10 Uhr die Zielhaltestelle erreichen. Die Haltestellenanbindung ist von zeitlichen Restriktionen unabhängig.

Da in den Zeitfenstern mitunter ein sehr heterogenes Fahrplanangebot mit schnellen und langsameren Verbindungen vorliegt, ist nicht die schnellste, sondern das 20%-Quantil die maßgebliche Reisezeit. Dieser

Wert besagt, dass 20% aller Verbindungsoptionen in einem Zeitintervall die gleiche oder eine geringere Reisezeit aufweisen (vgl. Abschnitt 2.3.3.3). Sind nicht mehr als fünf eigenständige Verbindungen vorhanden, entspricht das 20%-Quantil der schnellsten Verbindung. Für die Berechnung der Umsteigehäufigkeit wird ein analoges Verfahren verwendet. Gleichwohl bemisst sich das 20%-Quantil nicht über die Reisezeit, sondern die Umstiege. Dies bedeutet auch, dass die Umsteigehäufigkeit nicht immer den Verbindungen mit einer minimalen Reisezeit zugehörig ist.

Eine Berücksichtigung von Fahrpreisen erfolgt nicht, da diesen keine einheitliche Systematik zugrunde liegt und die notwendigen Datengrundlagen nicht verfügbar sind. Außerdem ist es nicht möglich, ein verallgemeinerbares Preisniveau zu ermitteln, da einzelne Personengruppen unterschiedliche Tickets nutzen. So kann, bezogen auf eine einzelne Fahrt, ein im Vergleich zum Einzelticket wesentlich geringerer Preis realisiert werden, wenn eine regelmäßige Nutzung über eine Zeitkarte abgegolten wird. Der Verzicht auf die Fahrpreisberechnung ist in regionalen Erreichbarkeitsmodellen üblich (vgl. Abschnitt 2.3.3.3).

Haltestellenanbindung

Da es sich um einen intermodalen ÖV-Verkehrsgraphen handelt, erfolgt die Anbindung der Raumstrukturen an die Haltestellen auf dem Fußwegenetz (vgl. Abschnitt 3.5.3). Diese Anbindung erlaubt die Widerstandsberechnung im ÖV von Tür-zu-Tür. Weil an großen Umsteigeknoten unterschiedliche Abfahrtsbereiche vorhanden sind (z. B. für den SPNV und ÖSPV), erfolgt die Anbindung an die standortscharfen Haltestellenbereiche. Die Gewichtung der Kanten des NMIV-Graphen wird in Abschnitt 3.5.3 vorgestellt. Eine gesonderte Anpassung für die ÖV-Berechnung erfolgt nicht. In Tabelle 17 sind Ansätze zum Umgang mit der Haltestellenanbindung aus anderen Untersuchungen aufgeführt. Zumeist wird auf durchschnittliche und räumlich nicht differenzierte Gehgeschwindigkeiten zurückgegriffen. Mitunter kommt auch ein Zeitaufschlag bei der Anbindung unterirdischer Haltestellen hinzu (Schwarze 2015, S. 224). Da jedoch weitere lokale Besonderheiten bestehen können (Dammlagen, Umzäunungen etc.), unterbleibt ihre modellseitige Abbildung.

Auf die Nachbildung von Bike and Ride wurde verzichtet, da dies einen zusätzlichen Anwendungsfall bedeutet hätte. Die Modellierung von Park and Ride dürfte zudem nicht ausschließlich auf reisezeitminimierenden Verbindungen basieren. Andernfalls wäre eine Minimierung des ÖV-Teils aufgrund der vergleichsweise langen Reisezeiten die Folge.

Tabelle 17: Ansätze zur Modellierung des Haltestellenzugangs

Quelle	Grundlage/Datenquelle	Annahme
Boarnet <i>et al.</i> 2017, S. 303	Luftlinie	4,8 km/h
Farber <i>et al.</i> 2014, S. 152	OSM	4,8 km/h
Fransen <i>et al.</i> 2015, S. 181	TomTom MultiNet	4 km/h
Karner 2018, S. 26	OSM	5 km/h
Lee & Miller 2018, S. 51	Fußnetz/MORPC*	5 km/h
Ritsema van Eck <i>et al.</i> 2005, S. 126	Fußnetz/Dutch Road Agency	4 km/h
Schwarze 2015, S. 218	OSM	Ø 4,8 km/h (Relief)
Stepniak & Goliszek 2017, S. 247	OSM	4,5 km/h

* Mid-Ohio Regional Planning Commission

Quelle: eigene Darstellung

Abhilfe schaffen die Integration der PRZ oder in Zeitwerte übersetzte Parkkosten.

Djurhuus *et al.* (2016, S. 13) haben am Beispiel der Metropolregion Kopenhagen gezeigt, dass die Erreichbarkeit mit öffentlichen Verkehrsmitteln um etwa 50% steigt, wenn nicht nur die nächstgelegene, sondern alle Haltestellen im Umkreis von einem Kilometer angebunden werden. Dieser Effekt tritt auf, wenn relativ dicht gelegene Haltestellen im Vergleich zu entfernteren 51 Mid-Ohio Regional Planning Commission Haltestellen ein wesentlich schlechteres Angebot aufweisen. Unter anderem kann in Städten mit einer hohen Haltestellendichte die Inkaufnahme längerer Wege sinnvoll sein, wenn dadurch Umstiege eingespart werden. Obgleich die Anzahl angebundener Haltestellen von großer Bedeutung ist, wird diese in der Literatur in der Regel nicht gesondert aufgeführt. Da große Knotenpunkte im Modell bis zu elf Haltestellenbereiche (Hbf.

Hamburg) umfassen und diese zumindest zwischen Verkehrsmitteln des SPNV und ÖSPV unterscheiden, werden die Gelegenheiten und Raumeinheiten an die nächsten sechs Bus- und drei Bahnhaltstellen angebunden. Dieses Verfahren soll auch in zentralen Gebieten die Anbindung der Haltestellenbereiche mit reisezeitminimierenden Fahrtoptionen gewährleisten. Schließlich ist die maximale Anbindungszeit festzulegen, welche ihrerseits aus der Zugangsweite resultiert. In Deutschland können 92,4% aller Einwohner innerhalb von 600 Metern Luftlinie eine Haltestelle erreichen (Pütz & Schönfelder 2018, S. 10). Außerdem legen in deutschen Großstädten nur rund 5% aller Personen Wege zur am häufigsten genutzten Haltestelle von über 20 Minuten zurück (Ahrens *et al.* 2015b, Tab. 3.10). Eine Befragung in Sydney hat ergeben, dass die Wegelängen zu Bushaltestellen mehrheitlich unter 351 Metern (Q₅⁵⁰: 655 Meter) und zu Bahnhöfen unter 750 Metern (Q₅: 1.018 Meter) liegen (Daniels & Mulley 2013, S. 14, 15). Die Analyse von GPS-Daten in Cincinnati (USA) ergab außerdem eine mittlere Zugangsweite von knapp 600 Metern bei einer Zugangszeit von 8,5 Minuten. Relevant sind auch die um etwa 50% geringeren Anbindungszeiten der Gelegenheiten (Zuo *et al.* 2018, S. 5, 6). Von der FGSV werden Luftlinienweiten zur nächsten Bushaltestelle zwischen 300 m und 700 m sowie zwischen 400 m und 1.200 m zum nächsten Bahnhof empfohlen (FGSV 2010, S. 7). Aufbauend auf diesen Werten wird im Modell eine maximale Anbindungszeit von 20 Minuten festgelegt. Bei einer mittleren Gehgeschwindigkeit von 4 km/h werden in dieser Zeit etwa 1,3 Kilometer zurückgelegt. Dieser hohe Wert soll in ländlichen Gebieten die Abbildung eines zumindest theoretischen ÖV-Angebotes ermöglichen. Auch dann, wenn die zugrundeliegenden Gehzeiten die Nutzung dieses Angebotes in den meisten Fällen ausschließen.

Startwartezeit und Bedienhäufigkeit

Die SWZ ist ein unvermeidbarer Teil der Wege im ÖV. Im Unterschied zu den in der Realität abweichenden Fahrplanzeiten ist sie nicht vorab determiniert. Sie ergibt sich vielmehr aus der Bedienhäufigkeit auf einer Relation, der Fahrplankennntnis und der Risikobereitschaft, die Abfahrt

50 Fünftes Quintil: 80% der Stichprobe liegen unter diesem Wert.

zugunsten einer geringen Wartezeit zu verpassen. Es können drei Ansätze zur Ermittlung der SWZ unterschieden werden (vgl. Abschnitt 2.3.3.3). Die Verwendung konstanter Zeitaufschläge (1), eine von der Taktfolgezeit an der Starthaltestelle abhängige Wartezeit (2) oder eine Wartezeit

Tabelle 18: Ansätze zur Modellierung der Startwartezeit

Autor(en)	Vorgehen und Annahmen
Boarnet <i>et al.</i> 2017, S. 302	Taktfolgezeit Hst.; Takt/2
Chowdhury <i>et al.</i> 2014, S. 79	konstant; keine Angabe
El-Geneidy <i>et al.</i> 2016, S. 307	konstant; Basis OTP
Farber <i>et al.</i> 2014, S. 152	konstant; 0,3 Minuten
Ford <i>et al.</i> 2015, S. 134	konstant; 3 min – 7, 5 min (Bus/Tram/Bahn)
Kujala <i>et al.</i> 2018, S. 48	Bedienhäufigkeit; Bedienhäufigkeit/2
Ritsema van Eck <i>et al.</i> 2005, S. 126	konstant; 2, 5 Minuten
Schwarze 2015, S. 154	Taktfolgezeit Hst.; keine Angabe
Stepniak & Goliszek 2017, S. 247	konstant; 15 Sekunden
Tribby & Zandbergen 2012, S. 349	Taktfolgezeit Hst.; Takt/2

Quelle: eigene Darstellung

in Abhängigkeit von der Bedienhäufigkeit auf der gesamten Verbindung (3). In Tabelle 18 sind unterschiedliche Ansätze und Parameter zur Bestimmung der SWZ aufgeführt.

Häufig werden einfache und sehr niedrige Zeitaufschläge verwendet, die unter Realbedingungen zumeist nicht einzuhalten sind (Farber *et al.* 2014; Ritsema van Eck *et al.* 2005; Stepniak & Goliszek 2017). Bei diesem Vorgehen sind keine weiteren Verbindungsinformationen zur Interpretation der Reisezeiten nötig. Denkbar ist außerdem die Verwendung der Taktfolgezeit an der Starthaltestelle. Gleichwohl ist dann für jede Verbindung die erstgenutzte Linie samt ihrer Fahrtenhäufigkeit im Zeitintervall zu ermitteln. Da die Taktfolgezeit an der Starthaltestelle gerade auf Umsteigeverbindungen zu einem deutlichen Überschätzen

Gleichung 2

$$BH_{rt} = \frac{(\text{Endzeit}_t - \text{Startzeit}_t)}{\text{Verbindungen}_{rt}}$$

BH_{rt} = Bedienhäufigkeit auf Verbindung r im Zeitintervall t

Startzeit_t = Startzeit des Zeitintervalls t in Stunden

Endzeit_t = Endzeit des Zeitintervalls t in Stunden

Verbindungen_{rt} = eigenständige Fahrten auf Verbindung r

im Zeitintervall t

der vorhandenen Verbindungsoptionen führen kann, muss der SWZ die Bedienhäufigkeit auf dem Gesamtweg zugrunde gelegt werden (vgl. Gleichung 2).

Dabei bleibt aber unberücksichtigt, dass diese Verbindungen auch gebündelt stattfinden können und nicht zwangsläufig einem glatten Takt entsprechen. Die Bündelung von Fahrten kann bei spontanen Reisen und in ländlichen Räumen also zu erheblich längeren Wartezeiten führen. Diese Einschränkung ist bei der Interpretation der Reisezeiten zu berücksichtigen. Die Berechnung der Raumwiderstände des ÖV erfolgt mit PTV Visum. Ein Grund für die Nutzung dieser Software ist die Berechnung der Bedienhäufigkeit auf Gesamtwegen. Sowohl mit dem OTP als auch dem ArcGIS NA ist dieser Raumwiderstand nur sehr umständlich zu ermitteln (vgl. Abschnitt 2.3.3.4). Zumeist wird die SWZ als halbe Taktfolgezeit an der Starthaltestelle oder auf der gesamten Verbindung definiert. Von einer Fahrplanorientierung wird nicht ausgegangen (vgl. Abschnitt 2.3.3.3). Die Annahme einer fehlenden Fahrplankenntnis oder Fahrplanorientierung (dichter Takt, Zeitreserven, spontane Reisen etc.) ist nur bis zu einem Takt von etwa 10 bis 15 Minuten plausibel (FGSV 2008, S. 48). Bei längeren Taktfolgezeiten sollte die Fahrplankenntnis jedoch als regressiver Faktor berücksichtigt werden (Salonen & Toivonen 2013, S. 152). Um spontane und geplante Reisen adäquat abzubilden, wird von der FGSV eine Gleichung ohne maximale SWZ vorgeschlagen (2008,

Gleichung 3

$$SWZ_{rt} = 0,53 * BH_{rt}^{\beta} \leq 10 \text{ mit } \beta = 0,75$$

SWZ_{rt} = Startwartezeit auf Verbindung r im Zeitintervall t in min

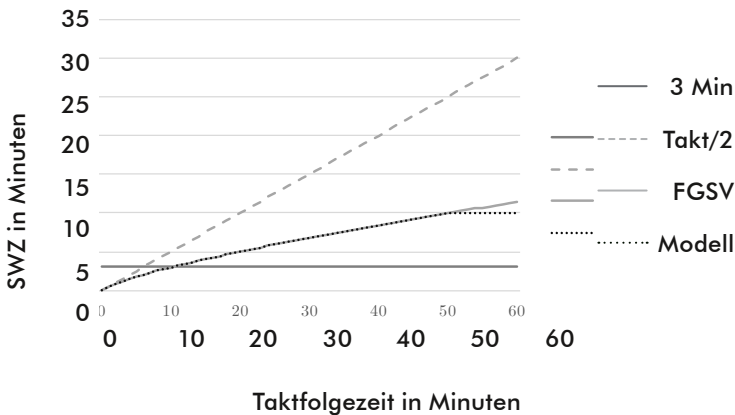
BH_{rt} = Bedienhäufigkeit auf Verbindung r im Zeitintervall t

β = Gewichtungsfaktor

S. 49). Die Gleichung wird auch in diesem Erreichbarkeitsmodell verwendet, allerdings mit einer maximalen Wartezeit von 10 Minuten versehen (vgl. Gleichung 3).

In Abbildung 29 ist die Abhängigkeit der SWZ von der Taktfolgezeit für unterschiedliche Formalisierungen dargestellt. Die von der FGSV vorgeschlagene Formel führt immer zu einer SWZ unterhalb der mittleren Taktzeitfolgezeit. Erst ab einer knapp stündlichen Bedienung wird die im Modell berücksichtigte maximale Wartezeit von 10 Minuten erreicht. Ein Verzicht auf diesen Maximalwert würde im ländlichen Raum mit seinen geringen Bedienfrequenzen schnell zu einer halbstündigen Wartezeit

Abbildung 29: Ansätze zur Modellierung der Startwartezeit



Quelle: eigene Darstellung

führen. Wird im Suchintervall von 09 Uhr bis 12 Uhr (drei Stunden) nur eine Fahrt angebunden, ergäbe sich eine SWZ von 26 Minuten. Eine solche mittlere Wartezeit wird jedoch als unrealistisch angesehen.

3.5.2 Motorisierter Individualverkehr

Die Integration des MIV in regionale Erreichbarkeitsmodelle ist aufgrund der großen Bedeutung auf langen Wegen und der hohen Verfügbarkeit routingfähiger Netze üblich. Gleichwohl bereiten der Umgang mit tageszeitabhängigen Reisezeiten und die Modellierung der PRZ erhebliche Schwierigkeiten.

Der MIV in regionalen Modellen

Regionale Erreichbarkeitsmodelle dienen vor allem der Berechnung von Raumwiderständen auf Wegen, die üblicherweise nicht zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt werden können. Daher sind MIV-Verkehrsgraphen fast immer in diesen Modellen enthalten. Zudem können einfache MIV-Verkehrsgraphen im Vergleich zu ÖV-Graphen wesentlich leichter erstellt werden. Zahlreiche Erreichbarkeitsmodelle basieren daher nach wie vor auf monomodalen Verkehrsgraphen des MIV. Zu diesen gehören die Modelle zur deutschlandweiten Analyse der Erreichbarkeit unterschiedlicher Daseinsvorsorgeeinrichtungen (Neumeier 2014; Neumeier 2017) und zur Bewertung der Notfallversorgung in Mecklenburg-Vorpommern (Seip *et al.* 2015). Hinzu kommen frühe länderübergreifende Erreichbarkeitsmodelle unter Einbeziehung kleinräumiger Raster (Friedwagner *et al.* 2014; Schürmann 2008).

Landesweite MIV-Graphen werden beispielsweise in Österreich und Deutschland von öffentlichen Einrichtungen zur Darstellung der bundesweiten und kleinräumigen Erreichbarkeitsverhältnisse eingesetzt. Schon im Jahr 2005 umfasste der MIV-Verkehrsgraph für Österreich etwa 2,1 Mio. Kanten und diente der Erreichbarkeitsberechnung in einem bewohnten 250-Meter-Raster (ÖROK 2007, S. 14). Das Netzmodell des BBSR enthält auf der vierfachen Fläche rund 660 Tsd. Kanten (BBSR 2019, S. 41). Soll ausschließlich die Reiseweite berechnet werden, kann auf unbearbeitete OSM-Daten zurückgegriffen werden. Es ist jedoch zu bedenken, dass in der Realität zumeist nicht die kürzesten, sondern die schnellsten Routen genutzt werden. Diese können, wie im

Erreichbarkeitsmodell Niedersachsen gezeigt, von kürzesten Wegen erheblich abweichen, da zumeist keine Feld- und Forstwege, Neben- oder Erschließungsstraßen genutzt werden (Peter 2019, S. 256). Um ein realistisches Abbild tatsächlich genutzter Wege und realisierter Reisezeiten zu erzielen, wird zumeist auf kommerzielle Netzgraphen oder aufbereitete OSM- und ATKIS-Daten⁵¹ zurückgegriffen (BBSR 2019, S. 41). Dabei ist die Verwendung kommerzieller Daten keineswegs unüblich, obgleich diese hohe Anschaffungskosten erzeugen (Neumeier 2014, S. 15; Franzen *et al.* 2015, S. 181). Mitunter werden von staatlichen Einrichtungen Netze mit kalibrierten Reisezeiten vorgehalten (Hess 2005, S. 1182; Owen & Levinso 2012, S. 15; Salonen & Toivonen 2013, S. 146). Eine weitere Möglichkeit ist die webbasierte Abfrage von Verbindungsinformationen über Google Maps.⁵² Da diese Ansätze hohe Kosten erzeugen oder die Gewichtung der Kanten häufig nicht nachzuvollziehen ist (blackboxing), werden immer wieder arbeitsintensive Verfahren zur regelbasierten Aufbereitung ungewichteter Netze eingesetzt (Martin *et al.* 2002, S. 5; Rauch & Rauh 2016, S. 442).

Wenn die Berechnung realistischer und mit anderen Verkehrsmitteln vergleichbarer MIVReisezeiten mit einem Erreichbarkeitsmodell zu garantieren ist stellt sich die Frage, inwiefern unterschiedliche Methoden zur Kantengewichtung die Modellqualität beeinflussen. Dabei ist unter anderem zu bedenken, dass etwaige Stauzeiten in den ÖV-Fahrtzeiten zumeist schon enthalten sind (Schwarze 2015, S. 152) und auf die PRZ nicht zu verzichten ist, wenn der ÖV inklusive SWZ und der fußläufigen Haltestellenanbindung modelliert wird (Salonen & Toivonen 2013, S. 150).

In einer Untersuchung im Auftrag des BBSR wurde die Qualität unterschiedlicher Datengrundlagen⁵³ in drei Beispielräumen untersucht (BBSR 2019, S. 42ff.). Die Setzung der Geschwindigkeiten erfolgte in Abhängigkeit von Streckenklassen, Geschwindigkeitsprofilen (BBSR),

51 Amtliches topographisch-kartographisches Informationssystem

52 Directions API: <https://developers.google.com/maps/documentation/directions/start> (letzter Zugriff: 27.09.2019)

53 Die Untersuchung beinhaltet Straßennetze aus den folgenden Quellen: OSM, DLM250 (Digitales Landschaftsmodell 1:250 000), BBSR-Straßenmodell und NE-MOBFStr (Netzmodell der Bundesfernstraßen)

Örtlichkeiten (innerorts oder außerorts; DLM₂₅₀/S&W⁵⁴) und Siedlungsdichten (OSM/S&W). Reisezeiten aus Google Maps und HERE (Online-Navigationsdienst) sowie aufbereitete Verkehrsdaten der Bergischen Universität Wuppertal dienten als Referenz (ebd., S. 49ff.). Die folgenden wesentlichen Untersuchungsergebnisse wurden erzielt:

- Die Festsetzung eines allgemein gültigen Geschwindigkeitsniveaus ist schwierig, da sich auch die Referenzwerte mitunter deutlich unterscheiden (ebd., S. 62).
- Die unterschiedlichen Netzdichten haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Ergebnisqualität (ebd., S. 45).
- Die Reisezeiten in regelbasierten freien Netzen unterscheiden sich erheblich (ebd., S. 58).

Die Arbeit kommt abschließend zu dem Ergebnis, dass die untersuchten regelbasierten Ansätze im Durchschnitt gute Ergebnisse liefern, aber mitunter immense tageszeitliche Abweichungen von den realen Reisezeiten bestehen. Zudem lassen sich keine einfachen Regeln definieren, die in verdichteten und ländlichen Räumen einerseits und im übergeordneten sowie nachgeordneten Straßennetz andererseits vergleichbar gute Ergebnisse liefern (ebd., S. 70). Da auch die Referenzwerte große Schwankungen aufweisen, kann kein allgemeingültiger MIV-Verkehrsgraph aufgebaut werden.

Kanten- und Knotenwiderstände im MIV-Verkehrsgraphen

Der Aufbau des MIV-Verkehrsgraphen erfolgt mit dem Ziel, konsistente, plausible und mit anderen Verkehrsmodi vergleichbare Reisezeiten zu ermitteln. Da freie und detaillierte Netze zu verwenden sind, wird auf OSM-Daten zurückgegriffen. Diese Datenquelle ist weitgehend aktuell und ermöglicht in der Zukunft die einfache Verstetigung des Netzmodells. Im ersten Schritt wurden bei der Geofabrik (Geofabrik GmbH & OSM o.J.⁵⁵) die vollständigen Netze der norddeutschen Bundesländer heruntergeladen und für das Gebiet der MRH (inkl. 20-Km-Puffer) zusammengefügt. Nicht vom MIV genutzte Streckenklassen wurden aus der

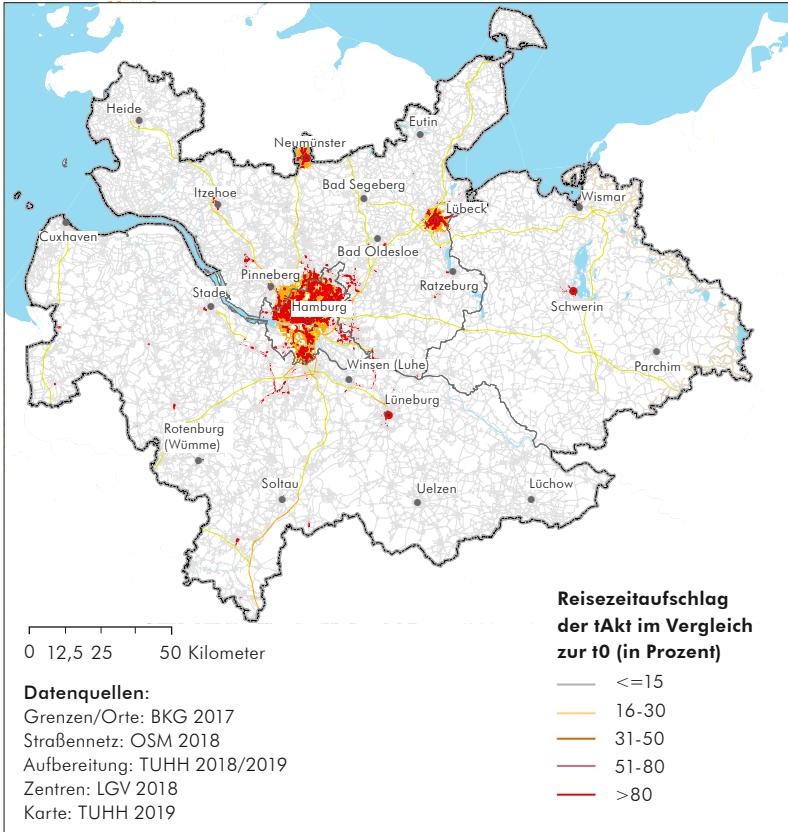
54 Spiekermann & Wegner Stadt- und Regionalforschung GbR

55 <http://download.geofabrik.de/europe/germany.html>
(letzter Zugriff: 05.02.2018)

Netzgeometrie entfernt. Zu diesen gehören u. a. Radwege, Fußgängerzonen und landwirtschaftlich genutzte Sonderwege. In OSM sind auch die Höchstgeschwindigkeit und die Anzahl der Fahrspuren für einen Großteil der Streckenelemente angegeben. Jeder Kante wurde die Örtlichkeit (innerorts oder außerorts) als zusätzliches Attribut hinzugefügt und in Abhängigkeit der in OSM hinterlegten Landnutzungsangaben festgelegt. Innerorts liegen alle Kanten die sich im Umkreis von 100 Metern zu einer als ›*residential*‹, ›*commercial*‹ oder ›*industrial*‹ klassifizierten Fläche befinden. Wenn keine Geschwindigkeit ausgewiesen ist, wird diese in Abhängigkeit von der Streckenklasse und der Örtlichkeit (innerorts oder außerorts) generiert. Da Autofahren nicht immer eindeutig zu identifizieren sind, wurden diese händisch eingepflegt und mit einer Geschwindigkeit von 7 km/h versehen. Der MIV-Verkehrsgraph umfasst 216.598 Kanten mit einer Gesamtlänge von rund 80.400 Kilometern. Da die Kantengewichte mit einem einfachen Nachfragemodell ermitteln wurden war es notwendig, das übergeordnete Straßennetz auch für Gebiete außerhalb des 20-Kilometer-Puffers aufzubereiten.

Das Nachfragemodell umfasst knapp 3 Tsd. Verkehrsbezirke, 10 Personengruppen und 11 Wegezwecke. In dieser Modellumgebung wurde die Nachfrage für den Zeitraum von 07 Uhr bis 09 Uhr generiert und auf das Netzmodell umgelegt. Die berechneten Reisezeiten wurden anschließend mit Hilfe der Daten aus Google Maps kalibriert und plausibilisiert. Das erstellte Netzmodell ermöglicht die realistische Berechnung von Reisezeiten im MIV innerhalb der morgendlichen HVZ. In Karte 11 sind die relativen Unterschiede der Reisezeit im belasteten (t_{Akt}) und im unbelasteten (t_0) Netz auf jeder Kante dargestellt. Das verwendete Verfahren ist in der Lage, den Einfluss der Siedlungsdichte, der Örtlichkeit und der Belastungen auf die Reisezeiten zu quantifizieren. Damit wird vermutlich eine höhere Differenzierung zwischen den einzelnen Streckenelementen erreicht, als es bei der Verwendung einfacher Regeln möglich wäre. Dabei wird eine durchschnittliche Geschwindigkeit von etwa 36,3 km/h im Gesamtnetz erzielt. Für Großstädte wurde 2008 eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 27,4 km/h im MIV ermittelt

Karte 11: Reisezeitvergleich zwischen der t_0 und der t_{Akt} in der MRH



(Ahrens *et al.* 2009b, Tab. 7.4.1). Dieser Wert umfasst jedoch den gesamten Weg von Tür-zu-Tür, also inklusive der PRZ. Die im Erreichbarkeitsmodell verwendeten PRZ führen im Ergebnis zu einem vergleichbaren Geschwindigkeitsniveau (vgl. Absatz Parkbezogene Reisezeiten – PRZ).

Parkbezogene Reisezeiten - PRZ

Im Verkehrsgraphen des MIV werden außerdem PRZ berücksichtigt, um dem Ziel der Widerstandsberechnung von Tür-zu-Tür zu entsprechen. Diese umfassen die fußläufigen Zu- und Abwege, den Parksuchverkehr sowie die eigentlichen Rüstzeiten (Aufschließen, Gepäck verstauen,

Starten etc.). Weil diese Modellparameter aufgrund fehlender Daten oder nicht verallgemeinerbarer Annahmen in der Regel nicht im regionalen Kontext zu ermitteln sind, wird auf die Berücksichtigung differenzierter PRZ in regionalen Erreichbarkeitsmodellen zumeist verzichtet (BBSR 2019, S. 105).

Da auch für die MRH keine ortsgenauen Angaben hinsichtlich der einzelnen Faktoren existieren und diese im Tages- und Wochenverlauf zudem erheblich variieren, wurde auf Durchschnittswerte in Abhängigkeit von raumstrukturellen Faktoren zurückgegriffen. Die Zugangszeit, Abgangszeit und Parksuchzeit werden auf Basis der Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) für fünf unterschiedliche Gebietstypen festgelegt (FGSV 2008). Beispielsweise wird in Kernbereichen von Oberzentren mit vorrangiger Nutzung für Einkäufe und Erledigungen ein Zeitaufschlag im Quell- und Zielverkehr von jeweils 2,5 Minuten vorgeschlagen (ebd., S. 47). Im Zielverkehr wird außerdem ein Zeitaufschlag von zwei Minuten bei normalem und von vier Minuten bei hohem Parkdruck empfohlen. In ländlichen Gebieten wird auf eine Parksuchzeit verzichtet und die Anbindung (Zu- und Abgang) mit jeweils einer Minute berücksichtigt. Tabelle 19 zeigt die der Einteilung in Gebietstypen zugrundeliegenden Kriterien und die zugehörigen PRZ im Quell- (t_{Ab}) sowie im Zielverkehr (t_{Zu}). Die Gebietstypen wurden für das flächendeckende 500-Meter-Raster auf Basis der in Abschnitt 3.4 dargestellten Strukturdatenbasis bestimmt. Über eine räumliche Verbindung erfolgt

Tabelle 19: Parkbezogene Reisezeiten nach Gebietstyp (FGSV-RIN)

Gebietstyp (RIN)	Kriterien	t _{Zu}	t _{Ab}
Kernbereich Oberzentrum	Luftlinie Oberzentrum ≤ 4 Kilometer UND mindestens 100 Läden in ≤ 1,5 Kilometern	4,5	2,5
Kernbereich Mittelzentrum	Luftlinie Mittelzentrum ≤ 2 Kilometer	3	2
Kernbereich Unterzentrum	mindestens 20 Läden in ≤ 1,5 Kilometern	2	1
Innenstadtrandbereich Oberzentrum	Luftlinie Oberzentrum ≤ 4 Kilometer	4	2
sonstige Gebiete	übrige Gebiete	1	1

Quelle: eigene Darstellung in
Anlehnung an die FGSV (2008, S. 47)

anschließend die Zuordnung zu den übrigen Raumbezugssystemen und Gelegenheiten. In Kapitel 5.1.2 wird untersucht, welchen Genauigkeitsgewinn eine solche Modellierung der PRZ erzeugt. Beantwortet wird außerdem, ob sich die Auflösung des Raumbezugssystems auf die Sichtbarkeit dieser Zeitaufschläge auswirkt.

3.5.3 Fuß- und Radverkehr

Für den NMIV wird ein eigener Verkehrsgraph mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus für den Fuß- und Radverkehr verwendet. Die Gehzeiten sind zudem die Grundlage für die Berechnung der Haltestellenanbindungen auf dem ÖV-Verkehrsgraphen (vgl. Abschnitt 3.5.1). Die Erstellung des Netzes erfolgte analog zum MIV auf Basis von OSM-Daten.

Der NMIV in regionalen Modellen

Aufgrund der guten Datenverfügbarkeit und der hohen Bedeutung für die Anbindung an Haltestellen ist die Berücksichtigung des NMIV in regionalen Modellen üblich. In der Regel werden jedoch sehr einfache Annahmen getroffen, die, zumindest im Fußverkehr, sowohl die Topographie als auch die Knotenwiderstände vernachlässigen (vgl. Tabelle 17). Wie in Abschnitt 2.3.1 dargelegt, variieren die Geschwindigkeiten im NMIV erheblich zwischen den einzelnen Nutzergruppen. So hat u. a. die individuelle Physis einen erheblichen Einfluss auf das realisierte Geschwindigkeitsniveau. Die Gewichtung von Kanten- und Knotenwiderständen wird zumeist so gewählt, dass zwischen Start- und Zielpunkten für alle Nutzergruppen verallgemeinerbare Reisezeiten abgebildet werden. Die Ermittlung von Knotenwiderständen und der Einfluss der Topographie bereiten einen erheblichen Arbeitsaufwand, welcher über die Verwendung von Luftliniendistanzen und Umwegfaktoren reduziert werden könnte (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Der Aufbau eines detaillierten Verkehrsgraphen des NMIV wird von Schwarze (2015, S. 214ff.) beschrieben. Die Ausgangsbasis ist ein einheitliches Geschwindigkeitsniveau von 4,8 km/h im Fuß- und von 16,0 km/h im Radverkehr. Auf Steigungen und im Gefälle weichen die modellierten Geschwindigkeiten jedoch deutlich ab. Die Höheninformationen stammen aus dem digitalen Geländemodell mit einer Auflösung

von 25 Metern (DGM 25). Mit diesen Informationen war es möglich, jeder Kante einen Widerstand in Abhängigkeit von der Steigung zuzuweisen. Weitere Zeitaufschläge von 5 bis 20 Sekunden wurden außerdem an Lichtsignalanlagen, Bahnübergängen und Überwegen berücksichtigt (ebd., S. 212, 219). Für 100 in der Region Dortmund zufällig ausgewählte Strecken erfolgt abschließend ein Vergleich der Reisezeit mit den web-basierten Routensuchprogramm Map24, ViaMichelin und dem Radroutenplaner NRW. Die Routendienste haben zumeist nahezu identische Reisezeiten im Vergleich zum NMIV Verkehrsgraphen ausgewiesen (ebd., S. 217, 220).

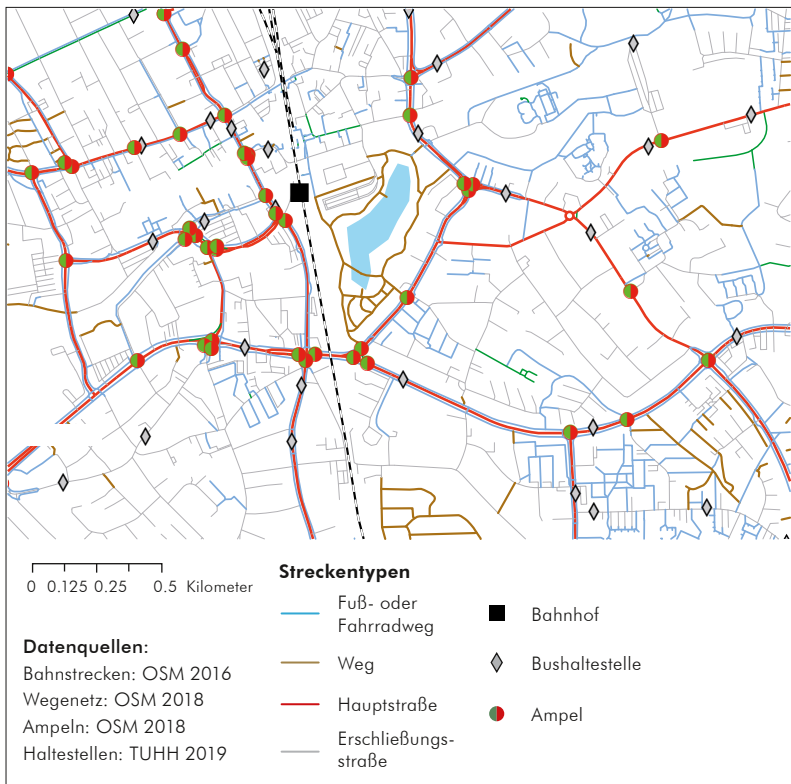
Aufbau und Gewichtung des NMIV-Verkehrsgraphen

Dem Verkehrsgraphen sollen für den Fuß- und Radverkehr jeweils verallgemeinerbare Durchschnittsgeschwindigkeiten auf Gesamtwegen zugrundeliegen. Berücksichtigt werden unterschiedliche Streckentypen, Ampeln und Steigungen. Laut einer Sonderauswertung zum Forschungsprojekt »Mobilität in Städten – SrV 2013« erreichen Fußgänger in Städten eine Durchschnittsgeschwindigkeit von rund 4,0 km/h. Im Radverkehr werden hingegen 11 km/h bis 12 km/h erzielt (Ahrens *et al.* 2015a, Tab.18(a) ff.). Die Werte gelten für Gesamtwege inklusive der Topographie und möglichen Verzögerungen an Knotenpunkten. Der Aufbau des NMIV-Verkehrsgraphen orientierte sich an diesen Durchschnittswerten. Im ersten Schritt wurden alle OSM-Kanten eliminiert die keine Nutzung im Fuß- und Radverkehr erlauben. Zu diesen gehören Autobahnen und Schnellstraßen sowie geplante oder noch nicht fertiggestellte Strecken. Das finale Straßennetz für die MRH (inkl. 20 km Puffer) umfasst 759.529 Kanten mit einer Gesamtlänge von rund 183 Tsd. Kilometern. In Karte 12 ist ein Ausschnitt des hochdetaillierten Streckennetzes für zusammengefasste Streckentypen dargestellt. Den einzelnen Streckentypen wurden unterschiedliche Geschwindigkeitsniveaus für den Fuß- und Radverkehr zugewiesen (vgl. Tabelle 20). Das mittlere Geschwindigkeitsniveau gilt auf steigungsfreien Kanten. Auf Straßen und Radwegen wird ein höheres Grundgeschwindigkeitsniveau unterstellt. Die Öffnung von Fußgängerzonen und Fußwegen für den Radverkehr soll den Entfall von in der Realität genutzten Verbindungen verhindern. Für den Fußverkehr wird in der Ebene ein einheitliches Geschwindigkeitsniveau von 4 km/h

angenommen, welches nicht vom Streckentyp oder baulichen Gegebenheiten beeinflusst wird. Die maximalen und minimalen Grenzwerte können auch im profilierten Gelände nicht über bzw. unterschritten werden. Im Gefälle liegt die maximale fußläufige Geschwindigkeit bei 6 km/h und auf Steigungen bei mindestens 3 km/h.

Zudem wird es als unrealistisch angenommen, dass ein typischer Radfahrer auch unter Idealbedingungen eine Geschwindigkeit von 24 km/h auf Gefällestrecken überschreitet. Die Mindestgeschwindigkeit im Radverkehr von 3 km/h entspricht dem Schieben des Fahrrades bei großen Steigungen. An Lichtsignalanlagen fällt eine mittlere Wartezeit von 30 Sekunden an. Dabei handelt es sich um einen konservativen Wert, der

Karte 12: Detaillierung des NMIV-Verkehrsrgraphen am Beispiel von Elmshorn



Quelle: eigene Darstellung

häufig unterschritten wird. Die OSM-Daten erlauben es jedoch nicht immer, die Menge der passierten Lichtsignalanlagen zuverlässig zu bestimmen. Außerdem wurde auf die Modellierung weiterer Verzögerungen an den übrigen Knoten verzichtet, da die Datenbasis als nicht ausreichend eingeschätzt wurde und belastbare Werte für ihre Nachbildung fehlen.

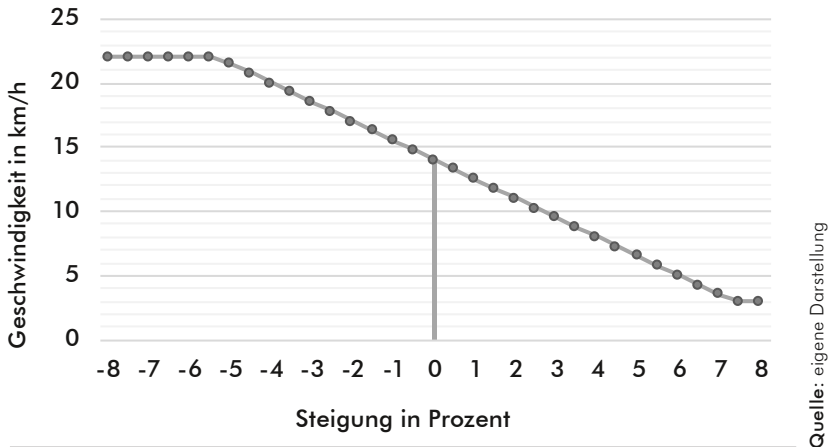
Die verwendeten Höhendaten haben eine Auflösung von rund 50 Metern und wurden auf der Shuttle Radar Topography Mission im Jahr 2000 erhoben (SRTM 2000). Es handelt sich um einen frei verfügbaren Datensatz, welcher für einen Großteil der Erdoberfläche zur Verfügung steht. Mit Hilfe dieser Daten wurde jeder Kante des OSM-Wegenetzes eine Steigung zugewiesen. Negative Steigungen entsprechen einer Gefällestrecke. Die Auflösung der Höhendaten erzeugt auf sehr kurzen Strecken unrealistisch große Steigungen. Die minimalen und maximalen Geschwindigkeiten im Radverkehr werden bei einer Steigung von 7,5% erreicht (vgl. Abbildung 30). Dies bedeutet auch, dass unrealistische

Tabelle 20: Geschwindigkeiten für ausgewählte Streckentypen im Fuß- und Radverkehr

v = Geschwindigkeit; \emptyset = v in der Ebene; min = minimale v auf Steigungen;
 max = maximale v im Gefälle

Streckentyp (OSM)	v_{Rad} (\emptyset , max, min)	$v_{Fu\beta}$ (\emptyset , max, min)
tertiary	14, 22, 3	4, 6, 3
secondary	14, 22, 3	4, 6, 3
residential	14, 22, 3	4, 6, 3
primary	14, 22, 3	4, 6, 3
pedestrian	8, 12, 3	4, 6, 3
Track (1-5)	13, 19, 3	4, 6, 3
living_street	13, 19, 3	4, 6, 3
cycleway	20, 24, 3	4, 6, 3
footway	8, 12, 3	4, 6, 3
steps	1, 1, 1	4, 6, 3
planned	geschlossen	geschlossen
highway	geschlossen	geschlossen
trunk	geschlossen	geschlossen
construction	geschlossen	geschlossen

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 30: Geschwindigkeiten auf dem Fahrrad in Abhängigkeit von der Steigung

Steigungen nur einen begrenzten negativen Einfluss auf die modellierten Geschwindigkeiten und Reisezeiten haben. Im Unterschied zu anderen Modellen wurde hier ein linearer Zusammenhang zwischen der Steigung und der Fahrgeschwindigkeit angenommen (Schwarze 2015, S. 215). Die modellierten Geschwindigkeitsniveaus sind jedoch nahezu identisch.

Abhängig von den genutzten Streckentypen, der Topographie und der Menge passierter Ampeln, ergibt sich auf dem NMIV-Verkehrsgraphen ein mittleres Geschwindigkeitsniveau von rund 4,0 km/h im Fuß- und von etwa 14,2 km/h im Radverkehr. Die im SrV ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeiten werden im Fußverkehr also erreicht. Gleichzeitig weist der Radverkehr ein um rund zwei km/h höheres Geschwindigkeitsniveau auf. Dies wird vor dem Hintergrund einer wachsenden Nutzung von Pedelecs und dem anhaltenden Infrastrukturausbau jedoch als plausibel angenommen.

3.6 Komplexe Erreichbarkeitsindikatoren

Mit dem Erreichbarkeitsmodell werden drei in der Planungspraxis besonders relevante Typen von komplexen und standortbasierten Erreichbarkeitsindikatoren berechnet (vgl. Tabelle 21). In Abschnitt

2.1.3.2 erfolgt eine theoretische Einführung dieser Messekonzepte sowie die Diskussion von Einsatzmöglichkeiten und Einsatzhemmnissen in der Planungspraxis. Zudem werden die jeweiligen Datenbedarfe und Rechenzeiten vorgestellt. In diesem Abschnitt erfolgt die Festlegung der einzelnen Erreichbarkeitsindikatoren auf Basis der theoretischen Vorüberlegungen. Die in Kapitel 5 vorgestellten Auswertungen zur räumlichen Auflösung und zur Detaillierung von Verkehrsgraphen werden mit Hilfe dieser Indikatoren durchgeführt. Da diese Indikatoren auch in zwei Forschungsprojekten zum Einsatz kommen, wurde bereits bei der Festlegung der Parameter auf eine möglichst hohe Praxistauglichkeit geachtet (vgl. Anmerkungen).

Tabelle 21: Abgrenzung der verwendeten Erreichbarkeitsindikatoren

	Reiseaufwand-indikator	Kumulations-indikator	Potenzial-indikator
Definition (Schwarze 2015, S.54)	<i>akkumulierter Reiseaufwand zu einem definierten Quantum an Aktivitäts-gelegenheiten</i>	<i>akkumulierte Aktivitäts-gelegenheiten innerhalb eines definierten Reisebudgets</i>	<i>akkumulierte Aktivitäts-gelegenheiten gewichtet mit einer Widerstands-funktion</i>
Beispiel	Reisezeit zum nächsten Supermarkt mit dem Pkw	mit dem Pkw in 30 Minuten erreichbare Arbeitsplätze	mit dem Pkw um die Reisezeit gewichtete erreichbare Arbeitsplätze
Relationen	n-zu-1	n-zu-n	gewichtete n-zu-n

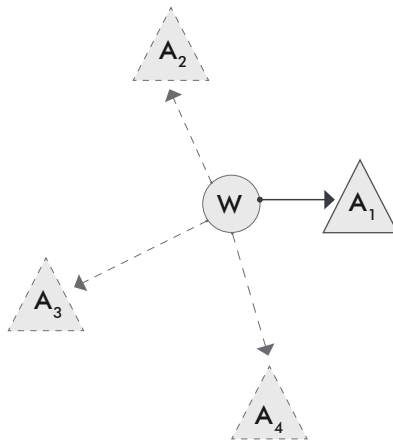
Quelle: eigene Darstellung

Sämtliche Erreichbarkeitsindikatoren werden für die sechs erstellten Raumbezugssysteme berechnet (vgl. Abschnitt 3.4.1). In Abhängigkeit von den jeweiligen Indikatoren kommen die in Abschnitt 3.4.2 vorgestellten Gelegenheitstypen als Zielpotenziale zum Einsatz. Die Raumwiderstände des NMIV, MIV und ÖV werden auf eigenen Verkehrsgraphen ermittelt (vgl. Abschnitt 3.5). In den folgenden Absätzen werden die bei der Berechnung der Erreichbarkeitsindikatoren getroffenen Annahmen beschrieben.

Reiseaufwandsindikatoren

Mit Reiseaufwandsindikatoren wird der akkumulierte Reiseaufwand zu einer definierten Menge an Gelegenheiten berechnet (Schwarze 2015, S. 54). Zu diesen gehören unter anderem die durchschnittliche Reisezeit zu den nächsten drei Supermärkten oder die Reisezeit zum übernächsten Hausarzt. Weitaus üblicher ist jedoch die Berechnung von Raumwiderständen zu nächstgelegenen Einrichtungen eines Gelegenheitstyps. Es wird also der auf Wegen zu bestimmten Einrichtungen mindestens zu überwindende Raumwiderstand ermittelt. Etwa die Reisezeit auf Fahrten ins nächste Oberzentrum oder die Reiseweite zur nächsten Grundschule. Bei Reiseaufwandsindikatoren wird aus einer Menge möglicher Verbindungen die widerstandsminimierende ausgewählt (vgl. Abbildung 31).

Abbildung 31: Aufbau des Reiseaufwandsindikators (minimale Reisezeit)



Quelle: eigene Darstellung

Aufgrund ihrer guten Interpretierbarkeit und der hohen Relevanz in der Planungspraxis werden in dieser Arbeit ausschließlich schnellste Wege zwischen Raumeinheiten und nächsten Einrichtungen unterschiedlicher Gelegenheitstypen berechnet (vgl. Gleichung 4). Weitere Widerstandsattribute wie die Reiseweite und die Bedienhäufigkeit werden den schnellsten Verbindungen entnommen. Dies kann zwar dazu führen, dass die Reiseweiten nicht immer dem kürzesten Weg entsprechen.

Gleichzeitig garantiert diese Einschränkung eine erhebliche Reduzierung der Rechendurchläufe. In welchem Umfang schnellste und kürzeste Wege auseinanderfallen, wird auch in Forschungsfrage drei beantwortet (vgl. Abschnitt 5.3.4).

Der fahrplanfeine ÖV-Verkehrsgraph ermöglicht die Berechnung schnellster Wege zum Zeitpunkt der maximalen Verkehrsnachfrage. Als Referenztag dient mit dem 19.02.2019 ein normaler Dienstag außerhalb der Ferien. Die minimalen Reisezeiten für die Zielpotenziale in den Wegezwecken Arbeit und Bildung werden für das Zeitintervall von 06 Uhr bis 08 Uhr berechnet. Dieses Zeitfenster ist ebenfalls die Grundlage für die Berechnung von Wegen zu allen Verkehrsknoten, da auch diese vornehmlich innerhalb der morgendlichen HVZ, u. a. auf Arbeits- und Schulwegen, angefahren werden. Die schnellsten Verbindungen der übrigen Wegezwecke (inkl. zentraler Orte) werden im Zeitintervall von 09 Uhr bis 12 Uhr berechnet. In allen Wegezwecken kommt grundsätzlich ein Nachlauf von zwei Stunden zur Anwendung (vgl. Abschnitt 3.5.1).

Gleichung 4

$$A_{ie} = \min\{g(D_{ej})c_{ij}\} \text{ mit } g(D_{ej}) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } D_{ej} \geq 1 \\ \infty & \text{wenn } D_{ej} = 0 \end{cases}$$

A_{ie} = minimale Reisezeit zwischen Startort i und Gelegenheitstyp e

D_{ej} = Gelegenheiten von Typ e an Zielort j

$g(D_{ej})$ = Gewichtungsfaktor in Abhängigkeit von den Gelegenheiten am Zielort

c_{ij} = Raumwiderstand zwischen Startort i und Zielort j

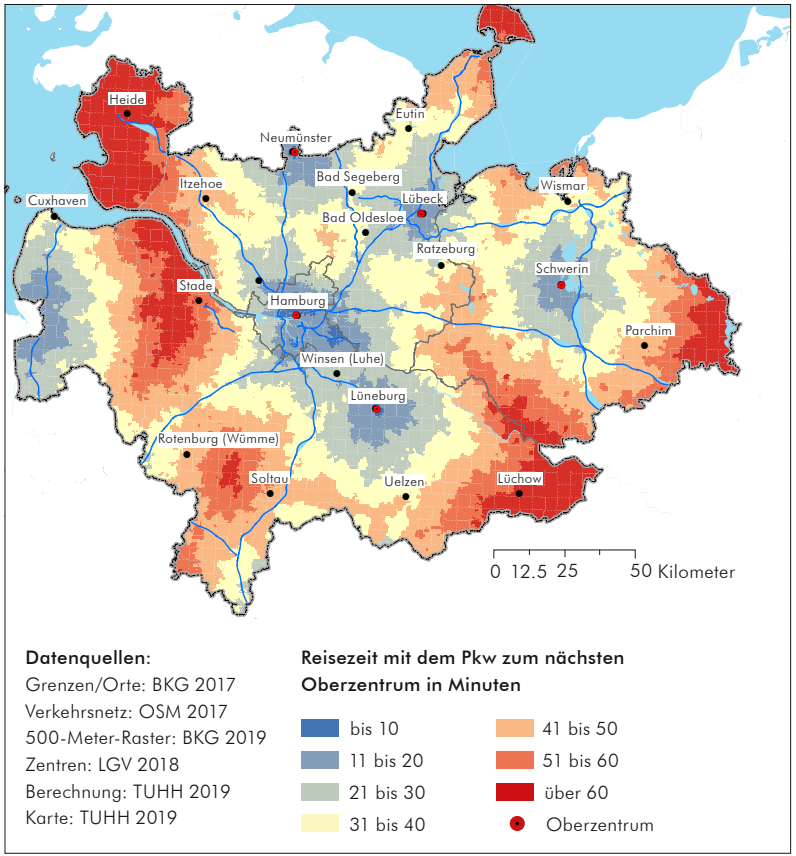
Aufgrund des regionalen Anwendungsfokus und der Vielzahl an Raumeinheiten und Gelegenheiten kommt der Reduzierung der Rechenzeit und damit der Beschränkung des Rechenbedarfes eine große Bedeutung zu. Die Begrenzung der maximal möglichen Reisezeit ist dabei ein gängiges Verfahren (Fransen *et al.* 2015, S. 182; Karner 2018, S. 26). Die durchschnittliche Wegelänge im MIV liegt deutschlandweit bei etwa 17 Kilometern und im ÖV bei rund 23 Kilometern (infas *et al.* 2019, S. 46).

Da diese Distanzen nach 30 Minuten bis 45 Minuten Fahrtzeit zurückgelegt werden und die Alltagsmobilität im Zentrum der Untersuchung steht, führt die modellseitige Begrenzung der Reisezeit auf 60 Minuten nur in Ausnahmefällen zu einer Nichtbeachtung relevanter Verbindungen. Nur in einzelnen ländlichen Gebieten scheitert die Berechnung minimaler Raumwiderstände im ÖV und Fußverkehr an diesem Kriterium. Für die folgenden 20 Gelegenheitstypen werden die schnellsten Verbindungen zwischen allen Raumeinheiten und der nächsten Einrichtung berechnet:

- Apotheken
- Ärzte {Hausärzte, Augenärzte, Internisten, Kinderärzte, Orthopäden}
- Krankenhäuser der Regel- oder Maximalversorgung
- Schulen {Grundschulen, weiterführende Schulen, Oberstufen, Förderschulen}
- Hochschulen
- Supermärkte
- Kindertagesstätten
- zentrale Orte {Oberzentren, Mittelzentren}
- Verkehrsknoten {Bahnhöfe, Fernbahnhöfe}
- Hauptbahnhof Hamburg
- Flughafen Hamburg

In Karte 13 ist beispielhaft die Reisezeit im MIV zum nächsten Oberzentrum in der MRH abgebildet. Zu den Oberzentren gehören unter anderem Hamburg (inkl. der B1-Zentren), Neumünster, Hannover und Rostock (vgl. Abschnitt 3.4.2). Wie in kartographischen Darstellungen üblich, ziehen sich konzentrische und flächendeckende Kreise um die einzelnen Zielpotenziale. Höhere Erreichbarkeitswerte sind im Verlauf der Autobahnen zu erkennen, deutliche Erreichbarkeitstäler befinden sich in den Randgebieten der MRH. Die Berechnung erfolgt auf einem 500-Meter-Raster, welches auch soziodemographische Angaben zur Wohnbevölkerung enthält. So ist eine umfassende und nicht auf kartographische Darstellungen beschränkte Analyse der Erreichbarkeitsverhältnisse möglich. In der MRH können 95,8% aller Bewohner innerhalb von maximal 60 Minuten das nächste Oberzentrum im MIV erreichen. Im ÖV liegt dieser Wert bei 67,8% und im Radverkehr bei 51,7%.

Karte 13: Reisezeit im MIV zum nächsten Oberzentrum in der MRH



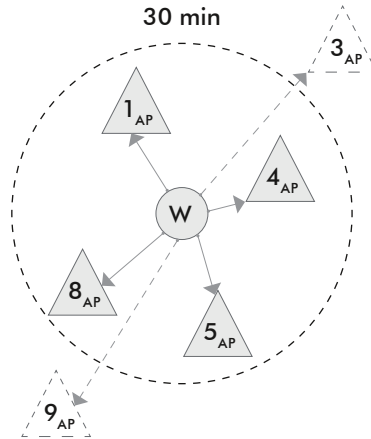
Quelle: eigene Darstellung

Kumulationsindikatoren

Mit Kumulationsindikatoren wird die Menge der innerhalb eines definierten Reisebudgets erreichbaren Gelegenheiten berechnet. Beispielsweise die Anzahl der mit dem Fahrrad innerhalb von 30 Minuten erreichbaren Arbeitsplätze. Die Festlegung des Budgets erfolgt zumeist auf Grundlage der Reisezeit oder der Reiseweite. Doch auch Umstiege und Reisekosten können als Reisebudget deklariert werden. In Abbildung 32 ist der Aufbau eines Kumulationsindikators dargestellt. Für einen Wohnstandort W werden ein Reisebudget von 30 Minuten angesetzt und anschließend die

erreichbaren Arbeitsplätze AP kumuliert (vgl. auch Gleichung 5). Insgesamt sind 18 der 30 Arbeitsplätze innerhalb von 30 Minuten zu erreichen.

Abbildung 32: Aufbau des Kumulationsindikators



Quelle: eigene Darstellung

In Tabelle 22 sind alle in dieser Arbeit verwendeten Reisebudgetindikatoren aufgeführt. Mit Arbeitsplätzen, Einwohnern, Freizeit- und Einkaufsgelegenheiten (aperiodischer Bedarf) werden Gelegenheitstypen aus unterschiedlichen Wegezwecken berücksichtigt. Insgesamt umfassen diese 549.041 Standorte, welche adressscharf, auf Rasterzellen- oder Straßenabschnittsebene vorgehalten werden (vgl. Abschnitt 3.4.2). Da der Raumwiderstand für alle Relationen zwischen maximal 289.789 Raumeinheiten (bewohntes 100-Meter-Raster) und 549 Tsd. Gelegenheiten zu berechnen ist, ergäbe sich eine Rechenzeit von mehreren Tagen.⁵⁶

Da mit dem Erreichbarkeitsmodell auch Szenarien berechnet werden sollen und die Aktualisierung der Datenbestände eine zumindest jährliche Aktualisierung erfordert, sind diese Rechenzeiten deutlich zu reduzieren. Gleichzeitig soll die hohe Genauigkeit der Ergebnisse erhalten bleiben. Ein Kompromiss ist die Übertragung der relevanten Gelegenheiten in ein

⁵⁶ Unter Nutzung eines handelsüblichen Desktoprechners mit 16 GB Arbeitsspeicher und einer CPU mit 4*2.300 MHz (i5-6200).

flächendeckendes 500-Meter-Raster. Mit diesem Ansatz reduziert sich die Anzahl der maßgeblichen Zielpunkte um 88,3% auf 64.094 500-Meter-Zellen (inkl. 20-Kilometer-Puffer) mit mindestens einem Zielpotenzial. Diese Vereinheitlichung der Raumbezugssysteme führt zu einer Reduktion der Rechenzeit auf rund zwei Tage.⁵⁷

Gleichung 5

$$CA_{ei} = \sum_{j=1}^j D_{ej} f(c_{ij}) = \begin{cases} 1 & \text{if } c_{ij} \leq \{15,30,60\} \\ 0 & \text{if } c_{ij} > \{15,30,60\} \end{cases}$$

CA_{ei} = erreichbare Gelegenheiten von Typ e am Startort i

D_{ej} = Einrichtungen von Typ e an Zielort j

c_{ij} = Raumwiderstand zwischen Startort i und Zielort j

$f(c_{ij})$ = Gewichtungsfaktor in Abhängigkeit von der Reisezeit

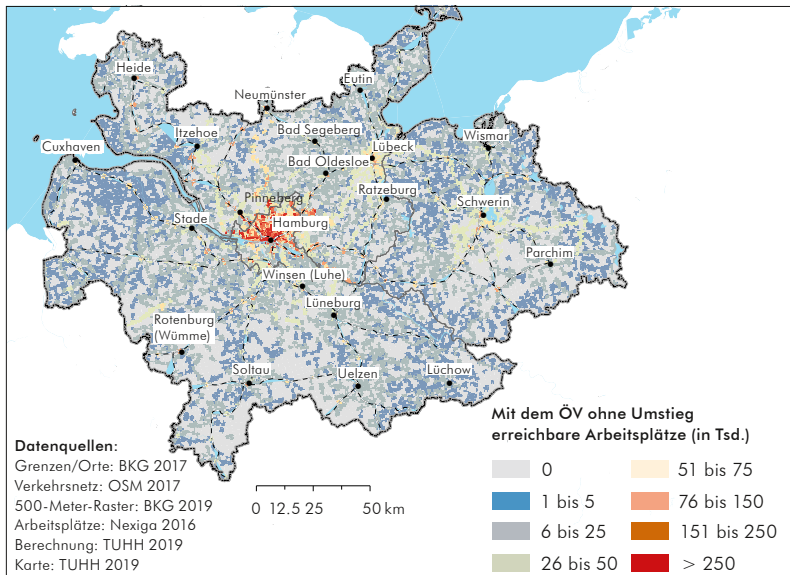
Tabelle 22: Parameter der verwendeten Kumulationsindikatoren

Gelegenheiten	Reisebudgets		
	NMIV	MIV	ÖV
Arbeitsplätze	15, 30min	15, 30, 60min	15, 30, 60min
	1 und 5 km	5 und 30 km	Umstiege = 0
Einwohner	15, 30min	15, 30, 60min	15, 30, 60min
	1 und 5 km	5 und 30 km	Umstiege = 0
Freizeitgelegenheiten	15, 30min	15, 30, 60min	15, 30, 60min
	1 und 5 km	5 und 30 km	Umstiege = 0
Einkaufsgelegenheiten (aperiodischer Bedarf)	15, 30min	15, 30, 60min	15, 30, 60min
	1 und 5 km	5 und 30 km	Umstiege = 0

57 Für Die Berechnung aller Kumulations- und Potenzialindikatoren in allen Raumbezugssystemen und für alle Verkehrsmodi.

Dem Individualverkehr werden insgesamt sechs Reisezeit- und Reiseweitenbudgets zugeordnet (vgl. Tabelle 2). Ein Reisezeitbudget von 15 bzw. 30 Minuten kommt sowohl im MIV als auch im NMIV zum Einsatz. Hingegen wird ein Reisezeitbudget von 60 Minuten nur für den MIV berechnet, da diese Reisezeit im Rad- und insbesondere im Fußverkehr als nicht relevant erachtet wird (Ahrens *et al.* 2009a, Tab. 7.1). Das maximale Zeitbudget von 60 Minuten im MIV orientiert sich an der bereits bei den Reiseaufwandsindikatoren verwendeten Maximalreisezeit zur Reduzierung der Rechenzeit. Die Erreichbarkeit im Individualverkehr lässt sich außerdem über ein einheitliches Distanzbudget von 5,0 Kilometern vergleichen. Der NMIV erhält ein weiteres Distanzbudget von 1,0 Kilometern und der MIV von 30,0 Kilometern. Damit wird das Ziel verfolgt, in den jeweiligen Verkehrsmodi nur die relevanten Erreichbarkeitswerte zu berechnen. Gleichwohl dienen identische Budgets dem Vergleich zwischen den Verkehrsmodi und erlauben außerdem die modionabhängige Analyse des Einflusses der räumlichen Auflösung auf die Genauigkeit von Kumulationsindikatoren (vgl. Kapitel 5).

Karte 14: Ohne Umstieg erreichbare Arbeitsplätze



Die Kumulationsindikatoren des ÖV basieren auf drei Reisezeitbudgets (15, 30, 60 min) sowie umsteigefreien Verbindungen (Umstiege = 0). Gerade die Menge an Direktverbindungen ist ein entscheidender Angebotsparameter des ÖV (Nassir *et al.* 2016, S. 30, 31). Zwar stellen auch die Fahrpreise einen relevanten Raumwiderstand dar, gleichwohl ist es auf regionaler Ebene zumeist nicht möglich, einzelnen Relationen verallgemeinerbare Fahrpreise zuzuordnen (vgl. Abschnitt 3.5.1). Die Fahrtweite kann mit dem ÖV-Verkehrsgraphen nicht berechnet werden und ist überdies kein relevanter Widerstandswert auf ÖV-Wegen. Anders als bei der Berechnung von Reiseaufwandsindikatoren, werden hier keine direkten Fußwege berücksichtigt. Dieser Vereinfachung liegt die Annahme zugrunde, dass nur das Reisebudget von 15 Minuten überhaupt einer geringen Beeinflussung unterliegt. Gleichzeitig ist die parallele Berechnung von Raumwiderständen im NMIV entbehrlich.

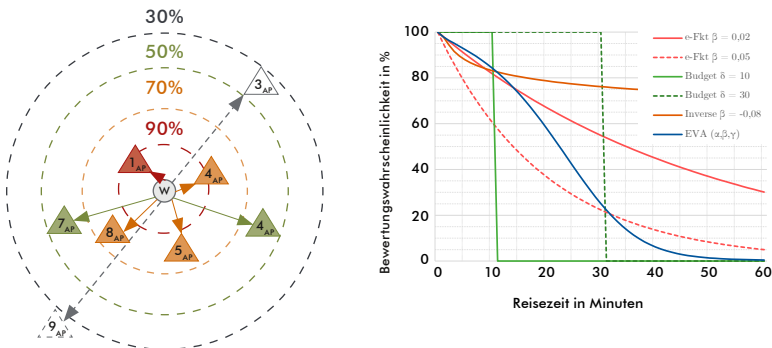
Kumulations- und Potenzialindikatoren werden ausschließlich für das Zeitintervall von 06 Uhr bis 08 Uhr und mit einem Nachlauf von zwei Stunden berechnet, da weitere Zeitintervalle eigene und zeitaufwendige Rechendurchläufe erfordert hätten (vgl. Abschnitt 3.5.1). Außerdem ist in dieser Zeit auch im ländlichen Raum ein gutes ÖPNV-Angebot (Schulbusverkehr) vorhanden und damit überhaupt die Abbildung von Erreichbarkeitswerten möglich. Der maßgebliche Wochentag ist auch hier der 19.02.2019 (normaler Dienstag).

In Karte 14 ist die Menge der mit öffentlichen Verkehrsmitteln zwischen 06 Uhr und 08 Uhr erreichbaren Arbeitsplätze auf umsteigefreien Verbindungen abgebildet. Deutlich zu erkennen sind sowohl die Bahnachsen im Hamburger Umland als auch die Ober- und Mittelzentren in Form von Arbeitsplatzschwerpunkten. Zudem sind gerade in den Landkreisen Nordwestmecklenburg und Ludwigslust-Parchim die Hauptbuslinien als wesentliche Verbindungsachsen sichtbar. Deutlich erkennbar ist auch die fehlende Bedienung in der Fläche. Darüber hinaus ist die räumliche Differenzierung der Erreichbarkeitswerte wesentlich ausgeprägter als im Radverkehr und im MIV (nicht dargestellt). In der MRH können 63,3% aller Bewohner innerhalb von 30 Minuten mindestens 100 Tsd. Arbeitsplätze mit dem Pkw erreichen. Im ÖV liegt dieser Wert bei 17,1%, im Radverkehr bei 27,0% und im Fußverkehr bei 0,6%.

Potenzialindikatoren

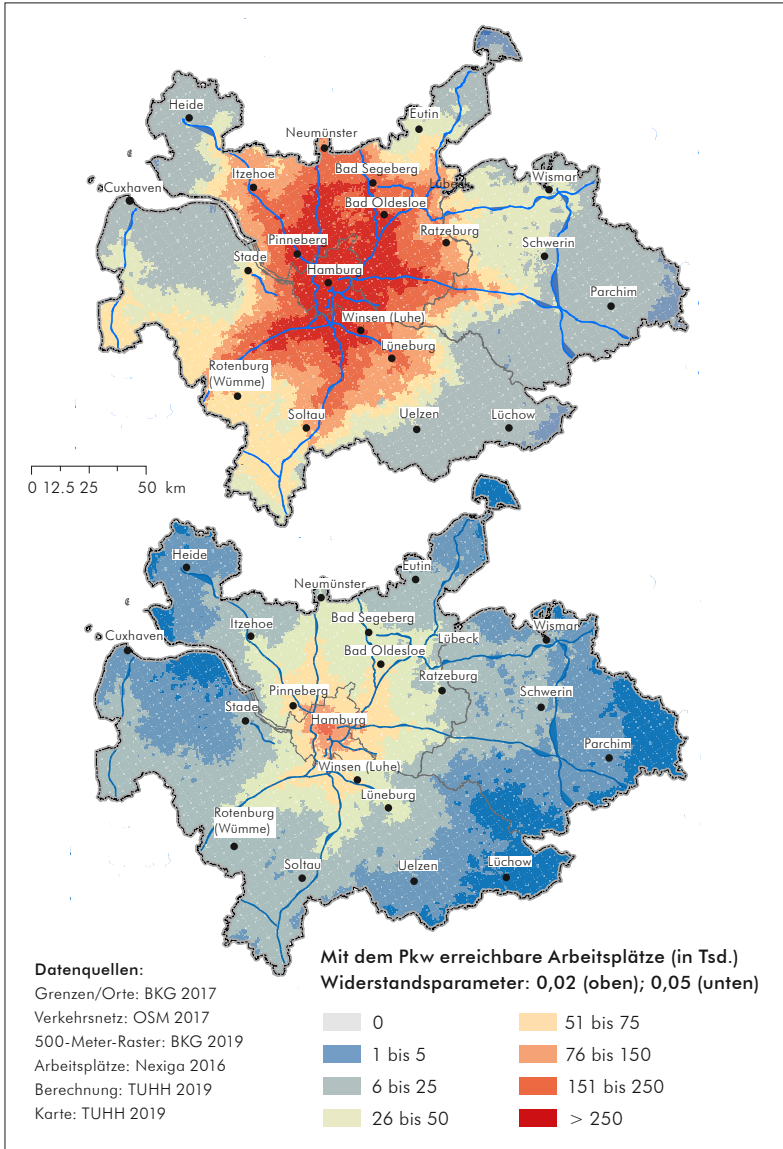
Auch bei der Berechnung von Potenzialindikatoren fließt für jede Raumeinheit der Raumwiderstand zu unterschiedlichen Gelegenheiten in die Erreichbarkeit. Die Raumwiderstände werden jedoch individuell gewichtet und nicht mit einem Reisebudget abgeglichen. Dieser Gewichtung liegt der erstmals von Hansen (1959) verwendete Gravitationsansatz zugrunde. Die Gewichtung der Zielpotenziale erfolgt in Abhängigkeit des zu überbrückenden Raumwiderstandes (vgl. Abbildung 33). Ein geringer Raumwiderstand führt zu einer hohen Gewichtung des Zielpotenzials. Beispielsweise werden nach 10 Minuten erreichte Ziele zu 80% (negative Exponentialfunktion mit $\beta = 0,02$) oder zu 60% (mit $\beta = 0,05$) gewichtet. Entsprechend fließen von zehn Arbeitsplätzen am Zielort acht beziehungsweise sechs Arbeitsplätze in das Erreichbarkeitspotenzial. Der maßgebliche Raumwiderstand ist zumeist die Reisezeit (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Die Stärke der Abwichtung wird über die Gewichtungsfunktion festgelegt. Ein ähnliches Verfahren kommt auch bei der Zielwahl im Rahmen der vierstufigen Verkehrsmodellierung zum Einsatz. Es werden im MIV und im ÖV nur Verbindungen mit einer maximalen Reisezeit von 60 Minuten und im NMIV von maximal 30 Minuten berücksichtigt. Die Attraktivität von Gelegenheiten kann unter anderem über die Anzahl an Arbeitsplätzen, die Bevölkerungszahl, aber auch über die Einkaufsfläche bestimmt werden. Auch hier werden Arbeitsplätze, Einwohner,

Abbildung 33: Funktionsweise des Potenzialindikators



Quelle: eigene Darstellung

Karte 15: Im MIV erreichbare Arbeitsplätze bei einer negativ exponentiellen Gewichtung



Freizeit- und Einkaufsgelegenheiten (aperiodischer Bedarf) als Zielpotenziale verwendet. Die Attraktivität entspricht jeweils der Anzahl der vorhandenen Ziele (vgl. Tabelle 23).

Gleichung 6

$$PA_{ei} = \sum_{j=1}^j D_{ej} e^{-\beta c_{ij}} \text{ mit } \beta \{-0,02; -0,05\}$$

PA_{ei} = erreichbare Gelegenheiten von Typ e am Startort i

D_{ej} = Zielpotenziale von Typ e an Zielort j

c_{ij} = Raumwiderstand zwischen Startort i und Zielort j

β = Widerstandsparameter

Die Berechnung von Potenzialindikatoren erfolgt über eine separate Gewichtung jeder Verbindung (vgl. Gleichung 6). Dafür wird in dieser Arbeit eine negative Exponentialfunktion zur Gewichtung der Zielpotenziale in Abhängigkeit von der Reisezeit verwendet (Hesse *et al.* 2012, S. 11). Je höher der Widerstandsparameter, desto stärker ist die Abwichtung und damit die Bewertungswahrscheinlichkeit eines Zielpotenzials (vgl. Abbildung 33). Die Widerstandsfunktion entspricht der Sensibilität von Personen gegenüber Raumwiderständen in Abhängigkeit vom Wegezweck. Es existieren zudem weitere Abwichtungsverfahren, die zu anderen Ergebnissen führen können (Hesse *et al.* 2012, S. 7ff.; Schwarze 2015, S. 148ff.). In dieser Arbeit wird unter anderem untersucht, wie die räumliche Auflösung und die Detaillierung von Netzgraphen die Genauigkeit von Potenzialindikatoren beeinflussen (vgl. Abschnitt 5.4).

Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass andere Widerstandsfunktionen zu grundsätzlich abweichenden Schlussfolgerungen führen, da die betrachteten Potenzial- und Kumulationsindikatoren bereits einen große Werte- und Streubereich abdecken. Außerdem spielen Potenzialindikatoren in der praktischen Anwendung aufgrund der eingeschränkten Interpretierbarkeit nur eine untergeordnete Rolle (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). In wissenschaftlichen Untersuchungen kommen sie hingegen in Form der negativ exponentiellen Gewichtung wesentlich häufiger zur Anwendung (vgl. Abschnitt 2.3.3.5).

Tabelle 23: Parameter der verwendeten Potenzialindikatoren

Gelegenheitstyp	Zielpotenzial	Widerstandsparameter	
		β_1	β_2
Arbeitsplätze	Anzahl Arbeitsplätze	0,05	0,02
Einwohner	Anzahl Einwohner	0,05	0,02
Freizeitgelegenheiten	Anzahl Gelegenheiten	0,05	0,02
Einkaufsgelegenheiten (aperiodischer Bedarf)	Anzahl Gelegenheiten	0,05	0,02

Quelle: eigene Darstellung

Der Einfluss des Widerstandsparameters auf die Anzahl der erreichbaren Arbeitsplätze im MIV ist in Karte 15 dargestellt. Da die Abwichtung bei einem Widerstandsparameter von 0,05 wesentlich stärker ist, sind regionale und lokale Unterschiede deutlicher ausgeprägt. Ein Widerstandsparameter von 0,02 führt hingegen zu einer stärkeren Glättung regionaler Disparitäten. Gleichzeitig nehmen die absoluten Erreichbarkeitswerte im Vergleich zur negativ exponentiellen Gewichtung mit 0,05 deutlich zu.

3.7 Einordnung der Ergebnisse und Möglichkeiten der Anwendung

Das entwickelte Erreichbarkeitsmodell bietet eine hohe räumliche Auflösung in einem regionalen Anwendungsgebiet mit einer Fläche von rund 28.500 km². Mit multimodalen und detaillierten Verkehrsgraphen für alle Verkehrsmodi und einem bewohnten 100-Meter-Rastermodell ermöglicht es die Berechnung komplexer Erreichbarkeitsindikatoren mit einer sehr hohen Genauigkeit. Bisher sind keine Erreichbarkeitsmodelle bekannt, die für eine ähnliche Anzahl an Raumeinheiten und Raumwiderständen die Berechnung von Reiseaufwands-, Kumulations- und Potenzialindikatoren ermöglichen. Das Modell soll die Erreichbarkeitsberechnung auf kleinräumiger Ebene durch die Planungspraxis erleichtern. Folglich kommt das Modell für die Berechnung von Szenarien zum Einsatz und ist regelmäßig zu aktualisieren. Nachfolgend werden die wesentlichen Aspekte der Übertragbarkeit des vorgestellten Ansatzes diskutiert.

Realisierung einer hohen Genauigkeit

Die Verwendung eines bewohnten 100-Meter-Rasters, eines fahrplanfeinen und intermodalen ÖV-Verkehrsgraphen sowie detaillierter Netze im Individualverkehr, ermöglichen die Erreichbarkeitsberechnung mit einer hohen Genauigkeit. Die hohe Detaillierung aller Verkehrsgraphen gewährleistet für alle Verkehrsmodi die Berechnung vergleichbarer Erreichbarkeitswerte. Lediglich für die Berechnung von Kumulations- und Potenzialindikatoren war es notwendig, die räumliche Auflösung der Gelegenheiten zu reduzieren, um überhaupt Erreichbarkeitswerte ermitteln zu können.

Umständlicher Aufbau eines Nachfragemodells

Im Verlauf der Arbeit hat sich gezeigt, dass der Aufbau eines komplexen Nachfragemodells nicht zielführend ist, da dieses Verfahren die Nachvollziehbarkeit der Kantengewichte wesentlich reduziert und die Verstetigung beeinträchtigt. Zudem steht diesem Aufwand kein adäquater Genauigkeitsgewinn gegenüber. Die Kalibrierung der Kantengewichte auf Basis von Navigations- und Befragungsdaten stellt letztlich eine regelbasierte Erweiterung der im Nachfragemodell berechneten Widerstände dar. Wie die von S&W im Auftrag des BBSR durchgeführten Analysen zeigen, können auch mit regelbasierten Gewichtungen von OSM-Graphen vergleichbar gute Ergebnisse erzielt werden, zumal allgemeingültige Kantengewichte ohnehin nicht existieren (BBSR 2019). Der Aufbau zukünftiger MIV-Verkehrsgraphen für regionale Erreichbarkeitsmodelle sollte daher auf regelbasierten Annahmen beruhen.

Berechnung von Szenarien

Prinzipiell erlaubt der Ansatz die Berechnung und den Vergleich von Szenarien, nachdem Änderungen an der Raumstruktur oder den Verkehrsgraphen vorgenommen wurden. Gleichwohl leidet unter der Verwendung getrennter Verkehrsgraphen und der Zwischenspeicherung der Ergebnisse die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Berechnungen. Außerdem wird die Szenarienberechnung von zu langen Rechenzeiten nach wie vor eingeschränkt.

Rechenzeiten

Die Berechnung der Erreichbarkeitsindikatoren für alle Raumbezugs-systeme und Verkehrsmodi benötigt mehrere Tage. Dies erschwert die Aktualisierung der Berechnungsergebnisse erheblich. Auch sind komplette Neuberechnungen einzelner Indikatoren notwendig, wenn Fehler an der Datenbasis im Rahmen der Validierung behoben werden. Es muss ein nutzbares Verfahren entwickelt werden, um für die einzelnen Ausschnitte Neuberechnungen durchzuführen und diese mit den übrigen Ergebnissen zu verschneiden. Außerdem ist zu überprüfen, ob auf den ArcGIS NA verzichtet werden kann, da insbesondere die Widerstandsberechnung im Individualverkehr sehr zeitaufwendig ist.

Einsatz teurer Spezialsoftware

Der Einsatz der vorgestellten Methode wird durch den Einsatz kostenintensiver Spezialsoftware in Form von ArcGIS und insbesondere PTV Visum deutlich erschwert. Gerade kleine Behörden und Planungsbüros kommen daher schnell an finanzielle Grenzen. Bisher hat sich noch kein Verfahren zur Berechnung vergleichbar detaillierte Auswertungen bei wesentlich geringeren Kosten durchgesetzt (Röntgen & Pusch 2019, S. 281ff.). Gerade im Bereich der fahrplanfeinen ÖV-Modellierung ist der Rückgriff auf freie Software bislang nicht gelungen. Gleichwohl kann es sinnvoll sein, auch hier ArcGIS zur Anwendung zu bringen und den Einsatz von PTV Visum zu vermeiden. Zu bedenken ist außerdem, dass der Einsatz freier Software die Kosten zwar reduziert, den Arbeitsaufwand aufgrund einer mangelhaften Dokumentation oder häufiger Programmfehler aber teilweise deutlich erhöht. Daher ist fraglich, ob freie Software die Arbeitsproduktivität erhalten kann.

Aufwendige Aktualisierung

Die regelmäßige Aktualisierung der Analyseergebnisse wird durch die noch immer langen Rechenzeiten deutlich erschwert. Auch der Einsatz lizenzpflichtiger Software versetzt nur Lizenznehmer in die Lage, solche Aktualisierung durchzuführen. Ein wesentlich größeres Problem ist jedoch die sehr zeitaufwendige Datenzusammenstellung, Datenaufbereitung und Datenvalidierung, da öffentliche Einrichtungen häufig nicht

die erforderlichen Strukturdaten zur Verfügung stellen. Entsprechend muss regelmäßig auf freie Quellen zurückgegriffen werden. Die Verwendung von OSM macht aber auch eine umfangreiche Datenaufbereitung erforderlich. Diese benötigt ein umfangreiches Know-how und gute Softwarekenntnisse zur Reduzierung des Zeitaufwands. Zudem produziert der umfassende Rückgriff auf OSM neue Abhängigkeiten und die zukünftig vorhandene hohe Datenqualität ist nicht zu garantieren.

Auch Fahrplandaten werden bisher nicht flächendeckend bereitgestellt. Häufig gelingt zwar der einmalige Aufbau regionaler Erreichbarkeitsmodelle, eine weitere Aktualisierung erfolgt dann aber nicht. Folglich sollten die bei Aktualisierung auftretenden Hindernisse bei der Erreichbarkeitsmodellierung deutlich stärker in den Blick genommen werden.

Notwendiges Expertenwissen

Das vorgestellte Erreichbarkeitsmodell soll in der Planungspraxis zum Einsatz kommen. Gleichwohl erfordern der Aufbau, die Modellberechnung und die Aktualisierung ein umfangreiches Expertenwissen. Da auch zukünftige Erreichbarkeitsmodelle nicht ohne dieses Wissen auskommen, sind Strategien zur langfristigen Sicherung dieses Wissens zu entwickeln. Auch in diesem Zusammenhang muss ein wesentlich stärkerer Fokus auf die organisatorische Einbettung von Erreichbarkeitsmodellen in den behördlichen Arbeitsablauf gelegt werden. Auf behördlicher Ebene ist zu entscheiden, ob eine zentrale oder dezentrale Praxisintegration von Erreichbarkeitsmodellen zu realisieren ist. Eine zentrale Integration würde eine Bündelung des Know-hows an einer zentralen Einrichtung erfordern. Die dezentrale Organisation setzt hingegen auf die Entwicklung nutzerfreundlicher PSS, welche nicht zwangsläufig verwaltungsintern aufgebaut und aktualisiert werden müssen.

Fehlende Kosten

Mit Erreichbarkeitsmodellen lassen sich zumeist keine Reisekosten für die einzelnen Verkehrsmodi ermitteln. Auch das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren ermöglicht in keinem Verkehrsmodus die Berechnung dieser Raumwiderstände. Gleichwohl ist es möglich, das genutzte Verfahren um eine Kostenkomponente zu erweitern. Im ÖV müsste eine Kostenmatrize auf Ebene der Haltestellenbereiche durch die

Verkehrsverbände geliefert oder selbst berechnet werden. Im Individualverkehr könnten die Reisekosten aus den Reiseweiten und Reisezeiten abgeleitet und um Fixkostensätze ergänzt werden. Die Berechnung von Reisekosten in den einzelnen Verkehrsmodi erfordert jedoch immer die Festlegung unterschiedlicher Parameter. Dazu gehören die Preise der genutzten ÖV-Tickets, die Abschreibungsraten von Pkw oder die Kraftstoffpreise.

Wissenschaftliche Nutzbarkeit

Die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen unterliegt im wissenschaftlichen Bereich grundsätzlich niedrigeren Hemmnissen. Dies liegt vor allem am zur Verfügung stehenden Expertenwissen und der finanziellen Förderung von Forschungsprojekten mit Erreichbarkeitsbezug. Mit dem vorgestellten Modell ist es möglich, die realen Erreichbarkeitsverhältnisse kleinräumig, multimodal und für alle Wegezwecke zu modellieren. Damit lassen sich unter anderem sozial exkludierte Personengruppen identifizieren und die Erreichbarkeiten in unterschiedlichen Räumen vergleichen.

Planerische Schlussfolgerungen

Mit dem entwickelten Modell ist es möglich, den Umfang und Genauigkeit von planerischen Grundlagen zu erhöhen. Beispielsweise kann das Modell in der Nahverkehrsplanung (vgl. Abschnitt 4.4), der Raumplanung und der Schulstandortplanung zum Einsatz kommen. Auch der Zusatznutzen neuer Verkehrsinfrastrukturen lässt sich ermitteln. Das Modell bietet insbesondere die Möglichkeit, die Erreichbarkeit der relevanten Daseinsvorsorgeeinrichtungen mit den Verkehrsmitteln des Umweltverbundes zu überprüfen. In diesem Zusammenhang ist es möglich, die Erreichbarkeit stärker in den Planungsfokus zu rücken (vgl. Abschnitt 1.2.1). Gleichwohl besteht die Möglichkeit, dass ein regionales Erreichbarkeitsmodell zu einer weiteren Aufweitung individueller Aktionsräume beiträgt und damit zusätzlichen Verkehr erzeugt. Allerdings bleibt offen, für welche planerischen Entscheidungen dieses Modell zum Einsatz kommen kann und inwiefern die Modellergebnisse diese Entscheidungen beeinflussen. Zukünftig ist bereits beim Modellaufbau die praktische Relevanz zu berücksichtigen.

4 Erreichbarkeitsanalysen in der Nahverkehrsplanung

Welche Verfahren zur Modellierung der Erreichbarkeit mit öffentlichen Verkehrsmitteln werden in der Nahverkehrsplanung aktuell eingesetzt?

In Kapitel 3 wird ein kleinräumiges und multimodales Erreichbarkeitsmodell auf regionaler Ebene vorgestellt, welches die Berechnung komplexer Erreichbarkeitsindikatoren ermöglicht. In diesem Kapitel wird untersucht, welchen Beitrag ein solches Modell in der Planungspraxis leisten kann. Nahverkehrspläne (NVP) als ein Instrument der ÖPNV-Fachplanung dienen als exemplarischer Anwendungsfall, da die Abbildung des öffentlichen Verkehrssystems in Erreichbarkeitsmodellen einen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet. Die abschließenden Empfehlungen dienen der anwendungsorientierten Weiterentwicklung von Erreichbarkeitsmodellen und der Verbesserung der Nahverkehrsplanung auf Basis kleinräumiger Erreichbarkeitsanalysen.

4.1 Nahverkehrspläne und regionale Erreichbarkeitsmodelle

Am Beispiel von NVP wird nachfolgend die Verbreitung von Erreichbarkeiten in der ÖPNV-Planung aufgezeigt und ihre Bedeutung für die Erreichbarkeitsmodellierung diskutiert. Dem Leitgedanken dieser Arbeit folgend, sollen sich Erreichbarkeitsmodelle an den Praxisanforderungen orientieren und auf nicht genutzte Detaillierungen verzichten. Welchen Beitrag detaillierte Erreichbarkeitsmodelle in der Nahverkehrsplanung leisten können, ist Gegenstand in Abschnitt 4.1.2. Die Beantwortung der dritten Forschungsfrage (vgl. Kapitel 5) widmet sich abschließend u. a. der Frage, inwiefern die Auflösung von Erreichbarkeitsmodellen die Ergebnisse beeinflusst. Die Analysen werden auch vor dem Hintergrund der in den NVP verwendeten Modellansätzen erörtert.

4.1.1 Die Funktion von Nahverkehrsplänen im Erreichbarkeitskontext

»Aufgabe der Verkehrsplanung ist die zielorientierte, [...] vorausschauende und informierte Vorbereitung von Entscheidungen über Handlungen, die den Verkehr [...] nach festgelegten Zielen beeinflussen« (FGSV 2001, S. 6). Die Entscheidungen werden in der Regel auf dem Gebiet des öffentlichen Rechts durch Behörden getroffen, entsprechend sind Verwaltungen (einschl. Verkehrsbetrieben) maßgeblich am Prozess der Verkehrsplanung beteiligt (ebd., S. 18).

Rechtliche Einordnung

NVP sind ein formales Planungsinstrument und kommen auf regionaler und kommunaler Ebene zum Einsatz (Scheiner 2003, S. 4). Sie dienen der strategischen Entwicklung der Qualität und Ausgestaltung des ÖPNV im jeweiligen Bedienegebiet (Knieling 2002, S. 1) und sollen sowohl finanzielle als auch landesplanerische Rahmenbedingungen berücksichtigen (Holz-Rau *et al.* 2009, S. 1). Sie sind in den Prozess der Nahverkehrsplanung eingebettet und beschränken sich auf den ÖPNV (Knieling 2002). Diese dient der Vororientierung, der Problemanalyse und der Umsetzung und Evaluierung von Maßnahmen im ÖSPV (FGSV 2001, S. 15). Die Fokussierung auf den ÖPNV wird mitunter in Zweifel gezogen, da der gesamte Bereich der Daseinsvorsorge zunehmend Eingang findet (Holz-Rau *et al.* 2009, S. 7). Die Träger der Nahverkehrsplanung sind zu meist auch verantwortlich für die Aufstellung der regionalen Raumordnungsprogramme (RROP) (ARL o.J.c). Diese liegen im »Spannungsfeld zwischen Landesplanung, Fachplanung und kommunaler Bauleitplanung [und] legen die angestrebte räumliche und strukturelle Entwicklung für den Planungsraum in seinen Grundzügen fest« (ML o.J.). Auch in den RROP werden Erreichbarkeitsziele und -standards formuliert, die sich in zahlreichen NVP wiederfinden. Zu diesen gehört u. a. die Erreichbarkeit von zentralen Orten und von Bildungseinrichtungen (BMVI 2017, S. 50ff.).

Ausgangspunkt für die Aufstellung von NVP ist die Regionalisierung des Personenverkehrs. Mit in Kraft treten des Regionalisierungsgesetzes (RegG⁵⁸) am 01.01.1996 wurden die Zuständigkeiten für Planung,

58 Regionalisierungsgesetz vom 27. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2378, 2395), das zuletzt durch Artikel 19 Absatz 23 des Gesetzes vom 23. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3234) geändert worden ist.

Organisation und Finanzierung des ÖPNV zusammengeführt und den Bundesländern übertragen (§3 RegG). Zugleich wurde die »Sicherstellung einer ausreichenden Bedienung der Bevölkerung mit Verkehrsleistungen im ÖPNV« als eine Aufgabe der Daseinsvorsorge festgeschrieben (§1 Abs. 1 RegG). Aufgabe der Bundesländer ist die Benennung der für die Sicherung der Daseinsvorsorge zuständigen Behörden. Die Bundesländer machen von der Möglichkeit Gebrauch und erlassen eigene ÖPNV-Gesetze. Darin benennen sie die Aufgabenträger, die verkehrspolitischen Ziele und die Finanzierungsinstrumente (Winter 2005, S. 7ff.). In der Regel übernehmen die Länder die Aufgabenträgerschaft im SPNV. Im ÖSPV obliegt diese hingegen den kommunalen Körperschaften (vgl. auch § 2 Abs. 1 u. 2 ÖPNVG⁵⁹). Das Instrument des NVP wurde 1996 in das Personenbeförderungsgesetz (PBefG⁶⁰) aufgenommen (Holz-Rau *et al.* 2009, S. 2). Demnach fällt es den Aufgabenträgern zu, »die Anforderungen an Umfang und Qualität des Verkehrsangebotes, dessen Umweltqualität sowie die Vorgaben für die verkehrsmittelübergreifende Integration der Verkehrsleistungen« zur Sicherung der Daseinsvorsorge in einem NVP zu definieren (§ 8 Abs. 3 Satz 2 PBefG).

Das PBefG adressiert ausschließlich kommunale Körperschaften und ist damit auf den ÖSPV beschränkt (§1 PBefG). Es benennt den NVP als Instrument zur Entwicklung des ÖSPV auf kommunaler Ebene im gesamten Bundesgebiet (§ 8 Abs. 3 Satz 8 PBefG). Die Abgrenzung der Aufgabenträgerschaft und die Ausgestaltung der NVP liegen im Zuständigkeitsbereich der Bundesländer und werden über ÖPNV-Gesetze definiert (§ 8 Abs. 3 Satz 9 PBefG). Beispielsweise legt das ÖPNVG (Schleswig-Holstein) fest, dass das für Verkehr zuständige Ministerium als Aufgabenträger für den SPNV einen landesweiten Nahverkehrsplan (LNVP) aufstellen kann (§ 4 Abs.4 ÖPNVG). Auch den Kommunen und ihren Zweckverbänden wird für den ÖSPV die gleiche Möglichkeit eingeräumt (§ 5 Abs. 1 ÖPNVG). In diesen Plänen sollen insbesondere eine

59 Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr in Schleswig-Holstein vom 26. Juni 1995 (GVBl. 1995, 262), das zuletzt durch Art. 20 LVO vom 16.01.2019 (GVBl. S. 30) geändert wurde.

60 Personenbeförderungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. August 1990 (BGBl. I S. 1690), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 14 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.

Bestandsaufnahme des Verkehrsnetzes und der Verkehrsnachfrage sowie die Festlegung der zukünftigen Entwicklung erfolgen. Hinzu kommen Angaben zur Barrierefreiheit, Finanzierung und Organisation des ÖPNV (§ 5 Abs. 2 ÖPNVG). Angebotsstandards, auch unter Erreichbarkeitsgesichtspunkten, sind hingegen nicht festzulegen. Das niedersächsische Nahverkehrsgesetz fordert die Aufstellung von jeweils fünf Jahre gültigen NVP (§ 6 Abs. 1 NNVG⁶¹). Hinsichtlich der inhaltlichen Ausgestaltung erfolgt auch hier keine weitergehende Spezifizierung.

NVP sind nicht verbindlich und entfalten nur eine mittelbare Außenwirkung (Holz-Rau *et al.* 2009, S. 2). Sie sind lediglich ein Instrument der ÖPNV-Planung, welche »durch die kommunale Verwaltung nachvollziehbar und transparent [vollzogen wird]« (ebd., S. 5). Ein Paradigmenwechsel vollzog sich jedoch mit der »Marktöffnungsverordnung« (1370/2007⁶²) auf europäischer Ebene. Diese stärkte die Rolle der Aufgabenträger, indem eine Verpflichtung zur wettbewerblichen Vergabe von ÖPNV-Leistungen verankert wurde. Die Aufgabenträger sind nunmehr für die strategische Planung und die Verkehrsunternehmen für die betriebliche Durchführung verantwortlich (ebd., S. 6). Fraglich ist, wie sich der strategische Gestaltungsanspruch auch mit Hilfe von Erreichbarkeitsanalysen einlösen lässt.

Umgang mit Erreichbarkeiten in Nahverkehrsplänen

Das Angebot an öffentlichen Verkehrsmitteln dient der Sicherung der Daseinsvorsorge und lässt sich auch mit Erreichbarkeitsindikatoren überprüfen (BMVBS 2010c; BMVI 2015; BMVBS 2010d). Dabei geht es nicht primär um die Wirtschaftlichkeit oder den Erfolg eines Angebotes, sondern darum, ob der ÖPNV in der Lage ist, der Bevölkerung ein Mindestmaß an Mobilität zu ermöglichen. Wie bereits in Abschnitt 1.2 erörtert, hängt individuelles Mobilitätsverhalten von persönlichen Faktoren und der räumlichen Verteilung und Verknüpfung von

61 Niedersächsisches Nahverkehrsgesetz vom 28. Juni 1995 (Nds. GVBl. 1995, 180), das zuletzt am 02.03.2017 (Nds. GVBl. S. 53) geändert wurde.

62 Verordnung (EG) Nr. 1370/2007 des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über öffentliche Personenverkehrsdienste auf Schiene und Straße und zur Aufhebung der Verordnungen (EWG) Nr. 1191/69 und (EWG) Nr. 1107/70 des Rates.

Aktivitätsgelegenheiten ab. Nahverkehrsplanung dient also auch der Erhöhung von Erreichbarkeit. Gleichzeitig wirken wirtschaftliche und finanzielle Rahmenbedingungen. Es besteht ein Unterschied zwischen der Befriedigung von Verkehrsbedarfen aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen und der Sicherung der Daseinsvorsorge im nachfrageschwachen ländlichen Raum (Geschwinder 2008, S. 8ff.).

Zur Bewertung des ÖPNV-Angebotes können die Zugänglichkeit, die Verfügbarkeit und die Reisezeit als harte Kriterien herangezogen werden (Winter 2005, S. 66, 67). Diese Angebotsqualitäten sind u. a. in der europäischen DIN-Norm 13816 festgeschrieben (DIN 2002) und lassen sich, von der Pünktlichkeit und den Reisekosten abgesehen, direkt in Erreichbarkeitsindikatoren übersetzen (Gorter *et al.* 2001; Winter 2005, S. 69). (Mindesterreichbarkeits-)Standards werden als ein Instrument vorgeschlagen, um Angebotsqualitäten festzusetzen (Winter 2005; Geschwinder 2008). Grundsätzlich lässt sich die Angebotsqualität in die Erschließungs-, Bedienungs- und Verbindungsqualität unterteilen (Winter 2005, S. 69ff.). Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) nutzt die Angebotsqualität zur Beschreibung der Bedienung und die Netzqualität zur Bewertung der Verbindung (VDV 2019, S. 9). Nachfolgend werden die Angebotsqualitäten vorgestellt und Ansätze zur Operationalisierung über Erreichbarkeitsindikatoren gegeben.

Erschließungsqualität

Als Erschließungsqualität wird die Zugänglichkeit von Haltestellen des ÖPNV bezeichnet (Winter 2005, S. 70). Sie hängt insbesondere von der Distanz zwischen Haltestellen und Raumstrukturen ab und kann mit Hilfe von Ausstattungs- und Distanzindikatoren gemessen werden (Schwarze 2015, S. 47ff.). Zu diesen gehören die Anzahl der Haltestellen in einer Gemeinde oder die Entfernung zum nächsten Bahnhof. Seit 2013 ist die vollständige Barrierefreiheit des Haltestellennetzes im PBefG festgeschrieben (§ 8 Abs. 3 PBefG). Bei der Barrierefreiheit handelt es sich jedoch nicht um die räumliche, sondern die physische Zugänglichkeit des öffentlichen Verkehrssystems welche nur indirekt mit Erreichbarkeitsindikatoren abgebildet wird.⁶³

63 Siehe auch: <https://wheelmap.org/> (letzter Zugriff: 10.04.2019)

Bedienungsqualität

Mitunter wird bemängelt, dass das Vorhandensein einer Haltestelle nicht bedeutet, dass ein gutes Verkehrsangebot besteht (Kreis Ostholstein 2014, S. 54). Die Bedienungsqualität umfasst u. a. die Fahrtenhäufigkeit, die Bedienzeiten an Haltestellen, das Platzangebot und die Haltestellenkoordination (VDV 2019, S. 9). Die Messung der Fahrtenhäufigkeit und der Bedienzeiten an Haltestellen ist den Ausstattungsindikatoren zugeordnet (Schwarze 2015, S. 47). Das Platzangebot und die Anschlusskoordination können nur auf Start-Ziel-Relationen bewertet werden und sind somit den Reiseaufwandsindikatoren zuzuordnen (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Häufig nennen NVP auch die Fahrtenhäufigkeiten auf bestimmten Linien. Zwar sind auch diese den Ausstattungsindikatoren zuzuordnen, gleichwohl werden sie in dieser Arbeit nicht als Erreichbarkeitsindikatoren definiert, da keine räumliche Verankerung über Haltestellen oder Raumstrukturen erfolgt. Die bloße Nennung der Fahrtenzahl auf einer Linie ermöglicht keine Aussage darüber, in welchen Gebieten, für welche Personen oder auf welchen Relationen ein Angebot besteht.

Verbindungsqualität

Letztlich ist es aber auch mit der Bedienungsqualität nur begrenzt möglich, die Angebotsqualität des ÖPNV auf konkreten Wegen zu bestimmen. Die Verbindungsqualität bezieht sich auf den Raumwiderstand zwischen zwei Punkten unter Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel (Winter 2005, S. 72). Die Daseinsvorsorge hängt auch davon ab, ob Personen in der Lage sind, unterschiedliche Gelegenheiten in einer angenehmen Reisezeit zu erreichen. Die Verbindungsqualität kann folglich aus dem Konzept der integrierten Erreichbarkeit abgeleitet und über komplexe Erreichbarkeitsindikatoren gemessen werden (Schwarze 2005, S. 10). Zu diesen Messgrößen gehören Reiseaufwands-, Kumulations- und Potenzialindikatoren (vgl. Abschnitt 2.1.3.2).

Die Angebotsqualitäten können zur Bestands- und Maßnahmenbewertung eingesetzt werden. Eine im Jahr 2010 veröffentlichte Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass 36 von 44 (82) untersuchten NVP eine Bestandsbewertung enthalten (BMVBS 2010b, S. 20). Im Gegensatz dazu wird jedoch nur in 17 von 44 (39) Plänen eine Maßnahmenbewertung durchgeführt (ebd., S. 21). Ähnlich selten ist auch eine Wirkungsanalyse der in den jeweils vorangegangenen NVP dokumentierten

Maßnahmen (ebd., S. 23). Eine solche Wirkungskontrolle ist notwendig, wenn die geplanten Maßnahmen keiner eingehenden Bewertung unterzogen wurden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass es den Aufgabenträgern häufig nur mit einem hohen Aufwand möglich ist, entsprechende Bewertungen durchzuführen (BMVBS 2010b, S. 24).

Außerdem ermöglicht die Angebotsqualität die Formulierung von Zielen und die Festlegung von Standards. Ungeachtet vorab definierter Maßnahmen obliegt es den Aufgabenträgern, das ÖPNV-Angebot vor dem Hintergrund dieser Standards zu entwickeln. Die genannte Untersuchung hat gezeigt, dass in 45 von 49 NVP Qualitätsziele formuliert werden. Aus diesen Zielen wurden jedoch nur in 17 Fällen klar definierte und zu messende Standards abgeleitet. Ohne Standards ist es hingegen nur sehr begrenzt möglich, die Einhaltung von Zielen zu überprüfen (ebd., S. 25ff.).

4.1.2 Potenzieller Beitrag von Erreichbarkeitsindikatoren

Wie im vorangehenden Abschnitt gezeigt, können die Angebotsqualitäten des ÖPNV mit Hilfe von Erreichbarkeitsindikatoren operationalisiert und bewertet werden. Der Inhalt und die Genauigkeit dieser Indikatoren hängen auch vom genutzten Erreichbarkeitsmodell ab. Schwarze (2005, S. 46) zeigte bereits im Jahr 2005, dass hochaufgelöste Erreichbarkeitsmodelle in der Lage sind, kleine Anpassungen am ÖPNV-System hinsichtlich ihrer Wirkungen zu beurteilen. Unter Verwendung eines 100-Meter-Rasters und aktueller Fahrplandaten wurden geringe Ausweitungen des ÖPNV-Angebotes in zwei Stadtteilen von Krefeld (D) vergleichend bewertet. Mit den verwendeten Kumulationsindikatoren war es möglich, Erreichbarkeitsveränderungen für unterschiedliche Wegezwecke und in Abhängigkeit von Wohnstandorten und Einwohnerzahlen zu ermitteln. Zwar erhöhte sich die Erreichbarkeit um maximal 4,2, dennoch konnten auch in diesem sehr geringen Wertebereich und auf Ebene von Stadtteilen differenzierte Aussagen getroffen werden (ebd., S. 43ff.). Betont wurde außerdem, dass die Verwendung von Reiseaufwandsindikatoren in der Nahverkehrsplanung zwar üblich ist, sich Reisebudgetindikatoren aber wesentlich besser zur Bewertung der Erreichbarkeit von Aktivitätsgelegenheiten eignen (ebd., S. 25).

Mit dem in Kapitel 3 vorgestellten Erreichbarkeitsmodell ist es möglich, die Qualität des ÖPNV-Angebotes über Fahrplandaten und auf Ebene von 100-Meter-Rasterzellen zu bewerten. Dabei können sowohl einfache als auch komplexe Erreichbarkeitsindikatoren zum Einsatz kommen, um die einzelnen Angebotsqualitäten zu messen. Die hohe Auflösung des ÖV-Verkehrsgraphen und des Raumbezugssystems gewährleisten die sensitive Bewertung von geringen Änderungen im ÖV-System. Der flexible Modellaufbau ermöglicht außerdem die Evaluierung der in einem NVP festgelegten Erreichbarkeitsstandards. Zudem können über regionale Kooperationen Synergien erzeugt werden, wenn Landkreise auf grenzüberschreitende regionale Erreichbarkeitsmodelle im Rahmen ihrer eigenen Nahverkehrsplanung zurückgreifen. Diese Synergien sind bedeutend, da der Einsatz hochaufgelöster Erreichbarkeitsmodelle jede kommunale Gebietskörperschaft schnell überfordert (vgl. Abschnitt 1.4).

4.2 Erreichbarkeitsinstrumente in Nahverkehrsplänen

Auf Basis von 22 kommunalen und landesweiten Nahverkehrsplänen wird der Umgang mit Erreichbarkeitsinstrumenten untersucht. Zu diesen gehören Erreichbarkeitsindikatoren zur Bewertung der Angebotsqualitäten und die zugrundeliegenden Erreichbarkeitsmodelle. Die Untersuchung richtet sich insbesondere auf die verwendeten Raumbezugssysteme und die modellseitige Detaillierung des öffentlichen Verkehrsangebotes. In den NVP werden Ziele formuliert und Standards festgelegt, deren Evaluierung unterschiedliche Anforderungen an Erreichbarkeitsmodelle stellt. Das Untersuchungsdesign und die Auswertungen stammen vom Autor dieser Arbeit. Zwischen 2017 und 2018 wurde zudem eine Bachelorarbeit mit dem Titel »Die Potenziale des Einsatzes der Erreichbarkeitsanalyse in Nahverkehrsplänen« betreut (Schäffer 2018). Einzelne Auswertungen und Ergebnisse dieser Bachelorarbeit dienten als Anregung.

4.2.1 Bestimmung der Untersuchungskriterien

Drei Fragen sollen hinsichtlich des Umgangs mit Erreichbarkeiten in NVP beantwortet werden. Erstens ist zu untersuchen, in welchem Umfang die Zielformulierung, die Festlegung von Standards und die

Bewertung von Angebotsqualitäten über Erreichbarkeit adressiert wird. Anschließend wird aufgezeigt, auf welchen räumlichen Bezugssystemen der jeweilige Umgang mit Erreichbarkeit basiert. Zudem stellt sich drittens die Frage, in welcher Detaillierung ein ÖV-Verkehrsgraph aufgebaut sein muss, um die relevanten Raumwiderstände zu liefern. Die Auswertung soll zeigen, auf welchen Modellansätzen die im Rahmen der Nahverkehrsplanung bereits durchgeführten Erreichbarkeitsanalysen basieren und wie Erreichbarkeitsmodelle aufgebaut sein müssen, um die in NVP formulierten Ziele und Standards zu bewerten. Die Bewertung der Angebotsqualität erfolgt über Karten, Tabellen und numerische Erreichbarkeitswerte. Aus diesen lassen sich direkt das verwendete Raumbezugssystem und der zugrundeliegende Modellierungsansatz ablesen.

Die Ableitung der räumlichen Auflösung und der Detaillierung des Netzmodells aus Erreichbarkeitszielen und -standards ist hingegen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Wird beispielsweise die ÖV-Erschließung aller Einwohner in einer Gemeinde gefordert, lässt sich diese auf Ebene von Gemeinden, Rasterzellen oder Wohnblöcken berechnen. Gleichwohl hat die Berechnung auf Gemeindeebene eine wesentlich geringere Repräsentativität gegenüber den einzelnen Einwohnern. Wird in den NVP kein Raumbezugssystem oder Modellierungsansatz angegeben, wird jeweils der Ansatz mit einer höchstmöglichen Genauigkeit angenommen. Mit diesem Ansatz lässt sich unter anderem beantworten, ob sich die festgelegten Erreichbarkeitsstandards mit den gängigen Methoden überhaupt überprüfen lassen.

Angebotsqualitäten und Erreichbarkeit

In NVP sollen Vorgaben definiert und überprüft werden, die der Sicherung der Daseinsvorsorge mit öffentlichen Verkehrsmitteln dienen und den ÖPNV als eine umweltschonende Alternative zum MIV entwickeln. Im Idealfall sind Standards festzulegen, die sich an diesen Zielen orientieren (BMVBS 2010b, S. 25). Diese Standards lassen sich über die Erschließungs-, Bedienungs- und Verbindungsqualität auch mit Hilfe von Erreichbarkeitsindikatoren operationalisieren (vgl. Tabelle 24). Entscheidend ist, dass sich die einzelnen Angebotsqualitäten auf ein Raumbezugssystem übertragen lassen. Dies betrifft u.a. die Reisezeit ins nächste

Tabelle 24: Angebotsqualitäten und Erreichbarkeitsindikatoren im ÖPNV

	Erschließung	Bedienung	Verbindung
Fokus	Haltestellenzugang	Fahrtenhäufigkeit an Haltestellen	Raumwiderstände auf ganzen Wegen
Erreichbarkeitskategorie (Auswahl; vgl. Abschnitt 2.1)	<ul style="list-style-type: none"> • System accessibility • einfache Erreichbarkeit • infrastrukturbasierte Erreichbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • einfache Erreichbarkeit • infrastrukturbasierte Erreichbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • relative oder integrale Erreichbarkeit • standörtliche Erreichbarkeit • aktivitätsbezogene Erreichbarkeit • komplexe Erreichbarkeit
Erreichbarkeitsindikatoren (Auswahl)	<ul style="list-style-type: none"> • Gehzeit zur nächsten Haltestelle • Einzugsgebiet einer Haltestelle • Einwohner im Haltestelleneinzugsgebiet 	<ul style="list-style-type: none"> • Abfahrten an einer Haltestelle • letzte Abfahrt an einer Haltestelle • Anzahl der Linien an einer Haltestelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Reisezeit zum nächsten Oberzentrum (OZ) • Umsteige zum nächsten OZ • Reisezeitverhältnis ÖV/IV auf Wegen zum nächsten OZ • erreichbare Arbeitsplätze in 30 Minuten

Quelle: eigene Darstellung

Oberzentrum oder die Fahrtenhäufigkeit an Haltestellen. Die Reisezeit ins nächste Oberzentrum ist Gegenstand der Verbindungsqualität und lässt sich über Reiseaufwandsindikatoren messen.

Die Erschließung gibt Auskunft über die Einfachheit des Haltestellenzugangs und die räumliche Durchdringung durch den ÖPNV (Winter 2005, S. 70). Die Maximaldistanzen zu nächstgelegenen Haltestellen werden häufig auf Grundlage von FGSV-Kriterien definiert. Demnach gilt eine bebaute Fläche als erschlossen, »wenn mindestens 80 der Bebauung in die Haltestelleneinzugsbereiche entfallen« (FGSV 2010, S. 6). Diese definieren sich über die Luftliniendistanz in Abhängigkeit von der Gemeindeklasse und der Haltestellenkategorie (ebd., S. 17).

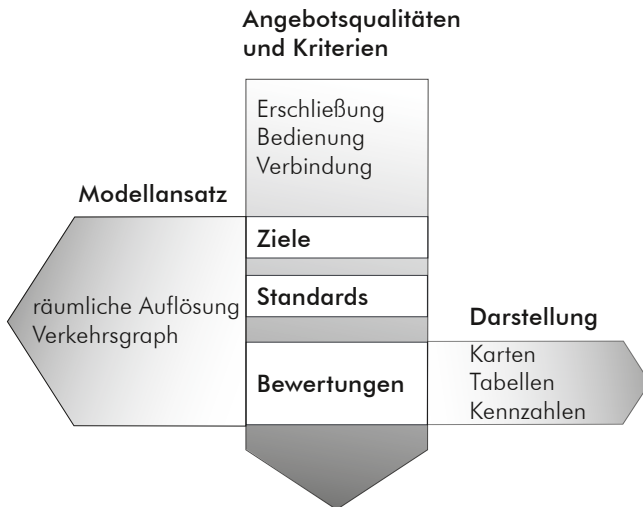
In der Regel wird die Erschließungsqualität mit Hilfe von Distanzindikatoren berechnet und über Isochronen dargestellt (Schwarze 2015, S. 50,54). Unter der Bedienungsqualität wird hingegen die Menge der Fahrtoptionen an den Haltestellen verstanden und über Ausstattungsindikatoren formalisiert (ebd., S. 47). Die Verbindungsqualität beschreibt die Leichtigkeit, mit der Personen von Standorten zu Gelegenheiten gelangen. Sie ist folglich der integrierten, standörtlichen und aktivitätsbasierten Erreichbarkeit zuzuordnen (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Erst unter Einbeziehung der Verbindungsqualität ist es möglich, die Qualität des ÖPNV-Angebotes zu bewerten. Da diese auch die Gehzeit zu den Haltestellen und die Verbindungshäufigkeit beinhalten sollte, können die Erschließungs- und Bedienungsqualität als Teilaspekte der Verbindungsqualität eingeordnet werden.

Möglichkeiten des Umgangs mit Erreichbarkeit

Die Angebotsqualitäten lassen sich mit Hilfe von Erreichbarkeiten operationalisieren. Dabei ist zwischen der Zielformulierung, der Festlegung von Standards und der Qualitätsbewertung zu unterscheiden (vgl. Abbildung 34). Mit diesem Ansatz lässt sich ermitteln, welche räumliche Auflösung und welcher Modellierungsansatz der angestrebten Operationalisierung zugrunde liegen muss. Gleichwohl lässt sich die Modellarchitektur nur bei den erfolgten Evaluierungen direkt aus tabellarischen und kartographischen Darstellungen ableiten. Auch Proffitt *et al.* (2019, S. 171) verwendeten bereits eine ähnliche Kategorisierung für die vergleichende Analyse von 42 RTP.

Ein einfacher Umgang mit der Angebotsqualität ist die Zielformulierung auf Basis von Erreichbarkeit (BMVBS 2010b, S. 25, 26). Beispielsweise nennt der NVP von Dithmarschen die Sicherstellung eines »bedarfsgerechten Verkehrsangebotes zu den Schulstandorten« als bedeutsames Ziel (urbanus GbR & SVG 2014, S. 58). Diese Ziele können in messbare Standards übersetzt und anschließend bewertet werden. So ist es u. a. möglich, maximale Reisezeiten und Umsteigehäufigkeiten auf Fahrten zum nächsten Standort zu definieren oder Fußwege zur nächsten Haltestelle auf 600 Meter zu begrenzen (urbanus GbR 2017, S. 45). Erreichbarkeitsinstrumente können eingesetzt werden, um die Einhaltung dieser Standards zu überprüfen und unterschiedliche Maßnahmen zu vergleichen. Gleichwohl ist es üblich, Erreichbarkeitsanalysen zur Bewertung des Ist-Zustandes und ohne ein festgelegtes Bewertungssystem durchzuführen (vgl. Abschnitt 4.3.1).

Abbildung 34: Untersuchungsdesign zum Vergleich von Nahverkehrsplänen



Quelle: eigene Darstellung

Räumliche Auflösung

Die Bewertung von Angebotsqualitäten über Erreichbarkeitsindikatoren erfolgt auf Grundlage einer vordefinierten räumlichen Auflösung. Diese muss die nötige Genauigkeit liefern und darf die Modellanwender gleichzeitig nicht überfordern. Wie in Abschnitt 2.2 ausgeführt, haben die räumliche Auflösung und mithin die Anzahl der Raumeinheiten einen erheblichen Einfluss auf die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen, da mit einer zunehmenden Auflösung die Rechenzeiten und Speicherbedarfe steigen. Gleichzeitig nimmt die Übersichtlichkeit auf Kartendarstellungen deutlich ab. Relevant ist daher die zur Überprüfung der Angebotsqualitäten in NVP erforderliche räumliche Auflösung. Wurde eine solche Bewertung im Rahmen einer Bestandsanalyse bereits durchgeführt, ist die verwendete räumliche Auflösung unmittelbar gegeben. Doch auch die formulierten Ziele und festgelegten Standards lassen sich auf eine räumliche Auflösung übertragen. Sollen beispielsweise alle Einwohner innerhalb von 300 Metern eine Haltestelle erreichen, erfordert die Evaluierung ein Erreichbarkeitsmodell mit standorttreuen Haltestellen und kleinräumigen Bevölkerungsdaten. Ob diese adressgenau oder aggregiert in Form von Rasterzellen oder anderen Gebietszuschnitten vorliegen müssen, lässt sich hingegen nicht ermitteln. Folglich ist die Ableitung einer räumlichen Auflösung auf Basis von Zielen und Standards zwangsläufig mit einer gewissen Unsicherheit verbunden. In dieser Arbeit werden die folgenden räumlichen Auflösungen unterschieden:

- Punkte und Adressen
- Rasterzellen
- administrative Einheiten (Gemeinden, Stadtteile etc.)
- Haltestellen
- Isochronen

Modellierungsansatz

Neben der räumlichen Auflösung entscheidet auch der verwendete Verkehrsgraph über die Nutzbarkeit eines Erreichbarkeitsmodells. Die notwendige Detaillierung ergibt sich direkt aus den genutzten Raumwiderständen und der räumlichen Auflösung. Je zahlreicher die Standorte und je differenzierter die Raumwiderstände, desto komplexer auch der zugrundeliegende Verkehrsgraph. In Tabelle 25 sind die unter-

schiedlichen Modellierungsansätze aufgeführt (vgl. Abschnitt 2.3). Der Modellierungsansatz berücksichtigt die verwendete Netzgrundlage und das Verfahren zur Berechnung der Raumwiderstände. Im einfachsten Ansatz kann auf einen Verkehrsgraphen komplett verzichtet werden, da lediglich Verbindungsinformationen für wenige Wege abgefragt werden. Etwa die Reisezeit auf Wegen im ÖPNV von ausgewählten Gemeinden in das nächste Mittelzentrum. Die notwendigen Verbindungsinformationen werden beispielsweise über ›bahn.de‹ oder ›maps.google.com‹ bereitgestellt. Komplexer ist die Verwendung eines GIS zur Berechnung von Haltestelleneinzugsgebieten über Luftliniendistanzen. Auch die kartographische Darstellung der Fahrtenhäufigkeit an Haltestellen erfordert den Einsatz eines GIS. Den Aufbau eines Verkehrsgraphen erfordern solche Analysen hingegen nicht.

Wesentlich aufwendiger ist das Routing auf realen Verkehrsnetzen bzw. unter Berücksichtigung von Fahrplandaten. In der Vergangenheit hat die Bewertung der Erschließungsqualität auf Basis von Gehzeiten oder Realdistanzen zu nächstgelegenen Haltestellen zugenommen. Solche Analysen erfordern jedoch das Vorhandensein routingfähiger Netze und den Einsatz von Spezialsoftware. Beides kann öffentliche Einrichtungen bereits vor kaum zu bewältigende Herausforderungen stellen (vgl. Abschnitt 1.6).

Prinzipiell ist es möglich, den ÖPNV in einem routingfähigen Netzwerk über durchschnittliche Geschwindigkeiten auf Linienwegen aber ohne Berücksichtigung der realen Fahrplanzeiten nachzubilden. Ein solches streckenfeines Verfahren wird u. a. von Mavoja *et al.* (2012) und von Chen *et al.* (2016) zur Reduktion der Modellkomplexität eingesetzt. Das aufwendigste Verfahren ist das fahrplanfeine Routing in einem ÖV-Verkehrsgraphen. Dabei werden die Raumwiderstände auf schnellsten Wegen unter Berücksichtigung der realen Fahrplanzeiten an einem bestimmten Wochentag ermittelt. Im linien- und fahrplanfeinen Verfahren können außerdem die Anbindungszeit der Haltestellen und die SWZ berechnet werden (vgl. Abschnitt 2.3.3). Da aktuelle Fahrplandaten häufig nicht verfügbar sind, ist der fahrplanfeine Ansatz auch von spezialisierten Modellentwicklern nicht immer umsetzbar. Auch erfordert der Umgang mit den wenigen geeigneten Routingalgorithmen und Softwarepaketen eine erhebliche Einarbeitungszeit. Folglich ermöglicht

dieser Ansatz zwar die genauesten Analysen, erzeugt aber gleichzeitig auch den höchsten Aufwand.

Tabelle 25: Vergleichene Modellierungsansätze

Modellierungsansatz	Anwendung ÖPNV	Anwendung IV
wenige Abfragen ohne Verkehrsgraph (<i>bahn.de etc.</i>)	<ul style="list-style-type: none"> wenige Verbindungen zum Zentrum 	<ul style="list-style-type: none"> wenige Verbindungen zum Zentrum
GIS <u>ohne</u> Routing	<ul style="list-style-type: none"> Einzugsbereiche von Haltestellen (Luftlinie) Fahrtenhäufigkeit an Haltestellen 	<ul style="list-style-type: none"> Luftlinien zu Gelegenheiten
GIS <u>mit</u> Routing (<i>streckenfein, linienfein</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Gehzeiten zu Haltestellen Fartzeiten auf Linienrouten 	<ul style="list-style-type: none"> Realdistanzen zu Gelegenheiten Reisezeiten zu Gelegenheiten
GIS <u>mit</u> ÖPNV-Routing (<i>fahrplanfein</i>)	<ul style="list-style-type: none"> reale Reisezeiten von Tür-zu-Tür Reisezeiten bei Nutzung alternativer Bedienformen 	

Quelle: eigene Darstellung

4.2.2 Auswahl der Nahverkehrspläne

Die Analyse basiert auf den NVP der 17 Landkreise und drei kreisfreien Städten in der MRH. Ergänzt wird das Sampling um die landesweiten Nahverkehrspläne von Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein. Die Vollerhebung im Gebiet der MRH umfasst somit 22 NVP und korrespondiert mit dem Untersuchungsraum des entwickelten Erreichbarkeitsmodells (vgl. Kapitel 3). Niedersachsen verfügt über keinen landesweiten NVP und der Verkehrsentwicklungsplan der Freien und Hansestadt Hamburg befand sich zum Untersuchungszeitpunkt noch in einem frühen Bearbeitungsstadium. Gleichwohl werden bei der Auswahl auch die folgenden Unterscheidungsmerkmale eingehalten:

Tabelle 26: Sampling der untersuchten Nahverkehrspläne

Typ = Gebietstyp nach siedlungsstrukturellen Kreistypen des BBSR (Raumordnungsbericht 2017, S. 10); BL = Bundesland;
 S = Schleswig-Holstein; M = Mecklenburg-Vorpommern; N = Niedersachsen

ID	Planungsgebiet	Typ	Gültigkeit	Bearbeitung
S1	Schleswig-Holstein	BL	2013 – 2017	Landesweite Verkehrsservice- gesellschaft mbH (LVS)
S2	Dithmarschen	sehr ländlich	2014 – 2018	urbanus GbR, SVG Südwestholstein, ÖPNV-Verwaltungsgemeinschaft
S3	Herzogtum Lauenburg	ländlich	2014 – 2018	urbanus GbR
S4	Lübeck (kreisfrei)	kreisfreie Großstadt	2019 – 2023	IGES Institut GmbH
S5	Neumünster (kreisfrei)	ländlich	2017 – 2022	PTV Transport Consult GmbH
S6	Ostholstein	ländlich	Ab 2014	Kreis Ostholstein, Fachdienst Regionale Planung
S7	Pinneberg	städtisch	2015 – 2019	SVG Südwestholstein
S8	Segeberg	ländlich	2014 – 2018	ÖPNV-Verwaltungsgemeinschaft
S9	Steinburg	sehr ländlich	2017 – 2021	urbanus GbR, SVG Südwestholstein ÖPNV-Verwaltungsgemeinschaft
S10	Stormarn	städtisch	2017 – 2021	urbanus GbR

Quelle: eigene Darstellung

ID	Planungsgebiet	Typ	Gültigkeit	Bearbeitung
M1	Mecklenburg-Vorpommern	BL	Ab 2018	Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung (Mecklenburg-Vorpommern)
M2	Ludwigslust-Parchim	sehr ländl.	Ab 2014	Planungsbüro für Verkehr, Bornkessel & Markgraf,
M3	Nordwestmecklenburg	ländlich	Ab 2015	ETC Transport Consultants GmbH
M4	Schwerin (kreisfrei)	ländlich	Ab 2017	urbanus GbR
N1	Cuxhaven	sehr ländlich	2019 – 2023	
N2	Harburg	städtisch	2017 – 2021	
N3	Heidekreis	sehr ländlich	2015 - 2019	
N4	Lüchow-Dannenberg	sehr ländlich	2016 – 2021	VNO (Verkehrsgesellschaft Nord-Ost-Niedersachsen mbh)
N5	Lüneburg	sehr ländlich	2018 – 2023	
N6	Rotenburg (Wümme)	sehr ländlich	2018 – 2022	
N7	Stade	ländlich	2018 – 2023	
N8	Uelzen	sehr ländlich	2014 - 2019	

Quelle: eigene Darstellung

- mehrere Bundesländer
- Landkreise und kreisfreie Städte
- unterschiedliche siedlungsstrukturelle Kreistypen (nach BBSR)
- behördeninterne und – externe Bearbeitung

Die untersuchten NVP sollen aus unterschiedlichen Bundesländern stammen, da die Nahverkehrsgesetze der Bundesländer diese wesentlich beeinflussen (vgl. Abschnitt 4.1.1). Überdies müssen neben Landkreisen auch kreisfreie Städte bei der Auswahl berücksichtigt werden, da andere wirtschaftliche, betriebliche und strukturelle Rahmenbedingungen bestehen. Beispielsweise spielt die Schülerbeförderung in Städten eine geringere relative Rolle. Gleichzeitig befindet sich der ÖPNV in größeren Städten aufgrund der höheren Nachfrage und Auslastung in einer grundsätzlich anderen Situation.

Weiterhin muss sichergestellt sein, dass unterschiedliche siedlungsstrukturelle Kreistypen berücksichtigt werden. Die Einteilung in kreisfreie Großstädte, städtische Kreise, ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen und dünn besiedelten ländlichen Kreisen entstammt dem Raumordnungsbericht (ROB) von 2017 (BBSR 2017, S. 10). Auch hier sind erhebliche Unterschiede in der Nachfrage- und Angebotsstruktur sowie den finanziellen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu erwarten. Ein Teil der berücksichtigten NVP sollte innerhalb der Verwaltung (Fachdienste, Verkehrsgesellschaften etc.), der andere Teil von externen Planungsbüros erstellt worden sein. Möglich ist, dass spezialisierte Dienstleister eher in der Lage sind, Erreichbarkeitsanalysen durchzuführen.

Neben den 20 Plänen von Landkreisen und kreisfreien Städten werden zwei landesweite Nahverkehrspläne (LNVP) ausgewählt, um auch den SPNV in das Sampling zu integrieren und eine größere Gebietskulisse abzudecken. Diese sind zu den kommunalen NVP weitgehend identisch, zielen jedoch auf den SPNV in Aufgabenträgerschaft der Bundesländer. In Schleswig-Holstein kann (§ 4 Abs. 1 ÖPNVG) und in Mecklenburg-Vorpommern muss ein solcher LNVP aufgestellt werden (§ 6 Abs. 1 ÖPNVG M-V⁶⁴). In Mecklenburg-Vorpommern wurde diese

64 Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr in Mecklenburg-Vorpommern vom 15. November 1995 (GVOBl. M-V 1995, S. 550), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 10. November 2009 (GVOBl. M-V S.606).

Pflicht in Form des »Integrierten Landesverkehrsplans« (ILVP M-V) erfüllt (MEID MV 2018). Dieser umfasst nicht nur den »ÖPNV-Landesplan«, sondern auch Vorgaben und Maßnahmen für die Verkehrsmodi des Individualverkehrs. Ziel ist die integrierte strategische Entwicklung des gesamten Verkehrssystems. Gleichwohl beschränkt sich die durchgeführte Analyse auf Auswertungen und Vorgaben zum ÖPNV. In Tabelle 26 sind alle im Sampling berücksichtigten NVP aufgeführt.

4.3 Untersuchungsergebnisse

Nachfolgend wird der Umgang mit Erreichbarkeit in den 22 untersuchten NVP diskutiert. Die adressierte Angebotsqualität, die räumliche Auflösung und der Modellierungsansatz bilden den Untersuchungsrahmen. Die Differenzierung erfolgt unter Berücksichtigung von Zielen, Angebotsstandards und Qualitätsbewertungen (vgl. Abbildung 34).

4.3.1 Angebotsqualitäten und Erreichbarkeit

In den 22 untersuchten NVP sind 362 Aussagen und Darstellungen mit einem klaren Erreichbarkeitsbezug enthalten (vgl. Tabelle 27). Von diesen Bezügen richten sich 62 auf die Erschließungs-, 104 auf die Bedienungs- und weitere 196 auf die Verbindungsqualität. Diese dienen in 71 Fällen der Zielformulierung, in weiteren 63 Fällen der Festlegung von Standards und in 228 Fällen der Erreichbarkeitsbewertung.

Tabelle 27: Häufigkeit des Umgangs mit Angebotsqualitäten
Aufsummiert sind die in alle untersuchten NVP aufgeführten Nennungen.

Angebotsqualität	Ziele	Standards	Bewertungen	Σ
Erschließung	12	19	31	62
Bedienung	4	16	84	104
Verbindung	55	28	113	196
Σ	71	63	228	362

Quelle: eigene Darstellung

Ziele

In 11 NVP werden insgesamt 12 sich auf die Erschließungsqualität beziehende Ziele formuliert. Besonders relevant ist dabei die Erschließung der Wohnbevölkerung. In fünf NVP wird die Verbesserung dieser mit Hilfe konkreter Maßnahmen gefordert (u. a. S5, S9, N4). Nennungen der Bedienungsqualität sind in den untersuchten NVP die Ausnahme und beziehen sich zumeist auf die Fahrtenhäufigkeit an Haltestellen (S3, S6, S9). Der ILVP M-V (M1) nennt darüber hinaus die häufigere Bedienung von Haltestellen und die Verknüpfung von ÖSPV und SPNV (MEID MV 2018, S. 11). Auf die Verbindungsqualität beziehen sich 55 Ziele in 19 NVP. Dabei weist die Erreichbarkeit zentraler Orte (u.a. S8, M2, N6) oder der Hamburger Innenstadt (S3, S10) die häufigsten Nennungen auf. In fünf NVP wird eine nicht näher spezifizierte gute Erreichbarkeit unterschiedlicher Gelegenheitstypen avisiert (u.a. S2, S3, S7). In Schwerin (M4) und dem Landkreis Ludwigslust-Parchim (M2) liegt der Fokus auf einer »bedarfsgerechten Gewährleistung« der Erreichbarkeit der Regionen und der Mobilität der Bevölkerung durch den ÖPNV (PBV & ETC 2014b, S. 8). Hingegen werden in zahlreichen NVP unterschiedliche Ziele benannt, die sich auf einen konkreten Gelegenheitstyp oder eine bestimmte Bevölkerungsgruppe beziehen. So ist der bedarfsgerechte ÖPNV auf Schulwegen nach Maßgabe von fünf NVP auszubauen oder zu gewährleisten (u. a. S2, S7, N2). Gerade in Schleswig-Holstein wird immer wieder die verbesserte Erreichbarkeit von Touristenorten angekündigt (S1, S6, S8). Weitere Ziele sind beispielsweise der Erhalt des Status quo (N1), die einfachere Kombination von Rad und öffentlichen Verkehrsmitteln zur Reisezeitreduktion (S10, M1) sowie die Verbesserung der Wettbewerbssituation des ÖPNV im Vergleich zum MIV (S10, M2, M3). Gerade in den Plänen der VNO (Verkehrsgesellschaft Nord-Ost-Niedersachsen mbH) für die Landkreise Niedersachsens befinden sich vielzählige Maßnahmen. Diese haben häufig einen unmittelbaren Erreichbarkeitsbezug, lassen sich mit einfachen Erreichbarkeitsmodellen jedoch nicht evaluieren (VNO 2017, S. 116ff.).

In den meisten NVP werden die Ziele und Maßnahmen aus landesplanerischen und rechtlichen Rahmensetzungen übernommen. Zu diesen gehören unter anderem die Landesentwicklungs- und Regionalpläne aber auch die ÖPNV-Gesetze und das Raumordnungsgesetz (ROG).

Es handelt sich folglich um die Adaption der ohnehin geltenden Rahmenrichtlinien ohne diese durch eigene Zielsetzungen zu erweitern (Kreis Pinneberg & SVG 2016, S. 17ff.). Da diese ohnehin gültig sind und nicht von den NVP begründet werden, erfolgte keine Berücksichtigung im Rahmen dieser Auswertungen.

Standards

Nicht immer werden die genannten Ziele in messbare Standards übersetzt. Wenn diese erfolgt werden Standards für die Erschließungs-, Bedienungs- und Verbindungsqualität in einer vergleichbaren Häufigkeit festgelegt. Die Standards der Erschließungsqualität beziehen sich zumeist auf maximale (Luftlinien-)Entfernungen zu nächstgelegenen Haltestellen (u. a. S5, M2, N1). Im Regelfall erfolgt eine Orientierung an den Vorgaben der FGSV (SVG 2014, S. 59). In den NVP aus Mecklenburg-Vorpommern werden diese Vorgaben ausdrücklich über Realdistanzen definiert (u. a. M2, M3, M4), in Niedersachsen wird hingegen das bloße Vorhandensein einer Haltestelle in jeder Gemeinde gefordert (u. a. N3, N4, N6). Mitunter erfolgte auch eine differenzierte Bewertung für den SPNV und den ÖSPV in Abhängigkeit von Gebietskategorien (urbanus GbR & SVG 2014, S. 63).

Insgesamt zeigt sich, dass die Bedienung der Haltestellen sowohl bei der Formulierung von Zielen als auch der Verankerung von Standards eine nur untergeordnete Rolle spielt. Kriterien der Mindestbedienung von Haltestellen beziehen sich zumeist auf die Bedienzeiten (u. a. S4, S7, S8) oder die Menge der Fahrtenpaare (u. a. N2, N3, N4).

Den 55 Zielvorgaben der Verbindungsqualität stehen 28 messbare Standards gegenüber. Die Erreichbarkeit der nächsten zentralen Orte bildet mit 25 Nennungen den Schwerpunkt dieser Standards. So sollen im Kreis Dithmarschen Direktverbindungen von allen Unterzentren in die Kreisstadt Heide bestehen (urbanus GbR & SVG 2014, S. 67). In Westmecklenburg (M2, M3, M4) werden Standards für unterschiedliche Achsen (Hauptachsen, Nebenachsen usw.) in Abhängigkeit von der Reisezeit, der Bedienungs- und der Umsteigehäufigkeit definiert (PBV & ETC 2014a, S. 35ff.). Zehn Standards beziehen sich auf das Reisezeitverhältnis zwischen ÖPNV und MIV (u. a. M1, N2, N8). So wird im NVP des Landkreises Cuxhaven (N1) eine ÖV-Reisezeit ins nächste Zentrum

als »gut« deklariert, wenn diese den 1,5-fachen Wert der MIV-Reisezeit unterschreitet (VNO 2019, S. 63).

Da die Barrierefreiheit im ÖPNV bis zum 01. Januar 2022 grundsätzlich herzustellen ist (§ 8 Abs. 3 PBefG), spielt diese in allen NVP eine zentrale Rolle. Fristverlängerungen müssen gemäß § 8 Abs. 3 Satz 4 PBefG in den jeweiligen NVP begründet werden. Die Argumentationsstrategien fallen aber unterschiedlich aus. Der Kreis Pinneberg nennt etwa die nicht gesicherte Finanzierbarkeit des kostenintensiven Haltestellenumbaus und die unklaren Zuständigkeiten (Kreis Pinneberg & SVG 2016, S. 113, 114). Auch im NVP des Landkreises Ludwigslust-Parchim wird betont, dass dieses Ziel aufgrund der *»regionalen und demographischen Spezifika mit derzeitigen finanziellen Rahmenbedingungen nicht umsetzbar«* ist (PBV & ETC GmbH 2014b, S. 74). Demnach ist innerhalb der Laufzeit des NVP ein Konzept zu erarbeiten, dass den Haltestellenumbau mit einer möglichst hohen Wirksamkeit garantiert (ebd., S. 75). Die VNO hat bereits ein Konzept erarbeitet, welches den Haltestellenumbau unter Berücksichtigung der Einwohner im Einzugsbereich und der Fahrtenhäufigkeit priorisiert (VNO 2018a, Anhang S. 6, 7). Insofern kommt der Erreichbarkeitsmessung auch in diesem Zusammenhang eine große Bedeutung zu, da die Ausbaustrategie auch über Erreichbarkeitsparameter entwickelt wird.

Bewertungen

Zwar fordern die Nahverkehrsgesetze der betrachteten Bundesländer keine Bestandsanalysen innerhalb der NVP⁶⁵, gleichwohl ist ihre Durchführung auch auf Basis von Erreichbarkeitsindikatoren üblich. Insgesamt sind in den NVP 228 Bewertungen der drei Angebotsqualitäten unter Bezugnahme auf Erreichbarkeit enthalten. Dabei spielen insbesondere die Bedienungs- und die Verbindungsqualität eine entscheidende Rolle (vgl. Tabelle 27). Die aufgeführten Nennungen beinhalten Kartendarstellungen, Tabellen und Erreichbarkeitswerte. Zwischen den einzelnen NVP gibt es deutliche Unterschiede. In Tabelle 28 ist wiedergegeben,

65 In den ÖPNV-Gesetzen von Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Niedersachsen wird primär eine deskriptive Bestandsanalyse des ÖPNV-Angebotes eingefordert. Zudem sind verkehrspolitische Ziele zu nennen. Siehe auch: ÖPNVG S-H, ÖPNVG M-V, NNVG, BayÖPNVG

wie sich die Bewertungen auf die Angebotsqualitäten und NVP verteilen. Auch die Darstellungsformen variieren erheblich. Während im NVP von Neumünster (S5) zahlreiche Erreichbarkeitskarten zum Einsatz kommen, werden in den NVP von Lüneburg (N5), Ludwigslust-Parchim (M12) und Schleswig-Holstein (S1) keine Bestandsanalysen unter Erreichbarkeitsgesichtspunkten durchgeführt (vgl. Tabelle 28). In den übrigen NVP dominieren tabellarische Darstellungen.

Die Erschließungsqualität wird in 18 NVP einer Bewertung unterzogen. In einigen Plänen wird die gute Erschließung betont und gleichzeitig auf die Lieferung korrespondierender Erreichbarkeitswerte verzichtet (u. a. S9, S10). In diesen Fällen können weder die räumliche Auflösung noch das Modellierungsverfahren abgeleitet werden (urbanus GbR & SVG 2017, S. 89; VNO 2017, S. 12ff.). In sechs NVP erfolgt die kartographische Darstellung der Erschließungsqualität über Haltestellen-Isochronen (u. a. S5, S8, M4). Diese basieren lediglich im NVP von Lübeck (S4) auf Realdistanzen (IGES 2018, S. 108).

Tabelle 28: Häufigkeit der Bewertung von Angebotsqualitäten

Kumuliert sind die in den NVP mit Hilfe von Erreichbarkeit adressierten Angebotsqualitäten; grau: > = 10; Die farbliche Kennzeichnung bezieht sich ausschließlich auf den einzelnen NVP.

Angebotsqualität	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	M1	Σ
Erschließung	0	1	2	1	6	0	1	4	1	2	0	18
Bedienung	0	0	0	1	2	5	3	3	1	0	0	15
Verbindung	0	4	2	0	10	5	2	0	1	1	15	40
Σ	0	5	4	2	18	10	6	7	3	3	15	73
	M2	M3	M4	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	Σ
Erschließung	0	1	2	1	1	2	2	0	1	2	1	13
Bedienung	0	1	0	0	12	9	7	0	16	15	9	69
Verbindung	0	1	5	7	13	9	7	0	7	15	9	73
Σ	0	3	7	8	26	20	16	0	24	32	19	155
ΣΣ	0	8	11	10	44	30	22	7	27	35	34	228

Quelle: eigene Darstellung

Die Haltestellenbedienung wird in 13 von 22 NVP bewertet. Dabei wird zumeist die weitgehende Einhaltung der aufgestellten Standards formuliert (u. a. S7, S8, S9). Die Bedienungsqualität wird mitunter auf die im Umkreis von Haltestellen wohnende Bevölkerung übertragen. Beispielsweise werden im Kreis Segeberg 87,6% der Bewohner entsprechend der definierten Mindestbedienungsstandards versorgt (SVG 2014, S. 84). In einigen NVP werden zudem die Fahrtenhäufigkeiten oder die Betriebszeiten der Haltestellen kartographisch abgebildet (u. a. S5, S6, M3). Analog zur Bewertung der Erschließungsqualität, ist auch hier das Berechnungsverfahren nicht immer transparent (PBV & ETC 2014b, S. 56).

Besonders häufig werden Verbindungsqualitäten berechnet und visuell dargestellt. In zwölf der untersuchten NVP werden Reisezeiten zu nächstgelegenen Zentren oder zentralen Umsteigeknoten abgebildet (u. a. M4, N1, N8). Daneben werden auch Reisezeiten von bzw. zu weiteren Gelegenheiten wie Supermärkten (M1) oder Tierparks (S5) über Erreichbarkeitskarten visualisiert. Teilweise werden einzelne Verbindungsqualitäten (Reisezeit, Umstiege, Takt) für die Verbindungen zwischen zentralen Orten tabellarisch aufbereitet (u. a. S2, S7).

In fünf NVP wird außerdem versucht, das Nachfragepotenzial von Maßnahmen zu bestimmen (u. a. S1, M2, M3). Eine Nachfrageprognose befindet sich unter anderem in den Plänen von Lübeck (S4) und Neumünster (S5). Für Nordwestmecklenburg (M3) werden die Erreichbarkeitsveränderungen unter Berücksichtigung einer deutlichen Angebotsausweitung über die Fahrtenhäufigkeit und die Reisezeit ins nächste Oberzentrum dargestellt (PBV & ETC 2015, S. 32, 35). In einigen NVP erfolgt überdies eine Umsetzungskontrolle der in der Vorperiode formulierten Maßnahmen. Auf eine dezidierte Wirkungsanalyse wird zumeist jedoch verzichtet (VNO 2018b, S. 14ff.).

Schlussfolgerungen – Angebotsqualitäten und Erreichbarkeit

Nur in einzelnen NVP werden Ziele formuliert und anschließend in Standards übersetzt und bewertet (u. a. S4, V1). Häufiger ist die fehlende Übersetzung genannter Ziele in messbare Größen (u. a. S1, S9). Beispielsweise wird im NVP des Kreises Pinneberg (S7) die Bedeutung der Anbindung von Arbeitsplatzschwerpunkten und Freizeitgelegenheiten

hervorgehoben und gleichzeitig auf eine weitergehende Bewertung verzichtet (Kreis Pinneberg & SVG 2016, S. 18). Daneben existieren zahlreiche NVP die zwar Standards definieren, diese jedoch nicht aus Zielen ableiten oder umfassend überprüfen (u. a. S₂, S₄, M₃). So werden im NVP Stormarn die vorab definierten Qualitätskriterien nur sehr eingeschränkt bei der Bestandsanalyse berücksichtigt (urbanus GbR 2017, S. 45ff., 79ff.). Auch für die definierten Maßnahmen erfolgt in der Regel keine Wirkungsanalyse, sondern maximal eine abschließende Umsetzungskontrolle. In zahlreichen Plänen befinden sich zudem kartographische Darstellungen, die sich weder auf vorab definierte Standards beziehen noch angemessen diskutiert werden (u. a. S₅, M₁).

Insgesamt ist zu konstatieren, dass Erreichbarkeitsziele und Erreichbarkeitsdarstellungen in der Nahverkehrsplanung nur in begrenztem Umfang zum Einsatz kommen. Dieser Befund bezieht sich insbesondere auf den stringenten Umgang mit Zielen, Standards und Bewertungen. Entsprechend leisten Erreichbarkeitsanalysen im Bereich der Nahverkehrsplanung noch nicht den Beitrag, wie er im Gesamtbereich der Daseinsvorsorge möglich und sinnvoll wäre. Zentral aufgebaute regionale Erreichbarkeitsmodelle könnten einen Beitrag leisten, um die Angebotsqualitäten des ÖPNV umfassend zu bewerten.

4.3.2 Räumliche Auflösung

Es stellt sich die Frage, welche räumliche Auflösung regionale Erreichbarkeitsmodelle aufweisen müssen, um die formulierten Standards zu bewerten und die Durchführung der bereits geleisteten Erreichbarkeitsanalysen auch zukünftig zu gewährleisten. Vor diesem Hintergrund werden die 22 NVP hinsichtlich der jeweils adressierten räumlichen Bezugssysteme untersucht. Aus den formulierten Erreichbarkeitszielen wird keine räumliche Auflösung abgeleitet, da die notwendigen Informationen in der Regel nicht vorhanden sind.

Standards

Tabelle 29 zeigt die Häufigkeit der räumlichen Bezugssysteme, auf die sich die verwendeten Angebotsstandards ableiten lassen. Wenn etwa eine flächendeckende Erschließung durch Haltestellen (i. d. R. Luftlinien-distanzen) angestrebt wird, verlangt dies die Berechnung und räumliche

Darstellung von Isochronen. Wenn jedoch klar definierte Bevölkerungsanteile innerhalb bestimmter Luftliniendistanzen zu ermitteln sind, ist auf Wohnstandorte oder bewohnte Rasterzellen zurückzugreifen (S₂, S₃, S₉). Mitunter wird jedoch bereits bei der Festlegung von Standards das adressierte Raumbezugssystem genannt. Zu diesen gehören unter anderem Gemeinden und Stadtteile (S₄, N₁). Welche räumliche Auflösung verwendet werden sollte um die Angebotsqualität repräsentativ zur Bevölkerung zu ermitteln, ist Gegenstand der in Kapitel 5 durchgeführten Analysen. Häufig sollen bestimmte Qualitäten der Erschließung und Bedienung mindestens für eine Haltestelle innerhalb einer Gemeinde eingehalten werden (u. a. S₆, N₁, N₂). Beispielsweise wird für den Heidekreis (N₃) das Vorhandensein einer Haltestelle in jedem Ort festgelegt. Die Evaluierung dieses Kriteriums kann demnach bereits auf Gemeindeebene erfolgen.

Tabelle 29: Häufigkeit des adressierten Raumbezugssystems bei der Festlegung von Standards

*Kumuliert sind die in den NVP verwendeten Raumbezugssysteme in Abhängigkeit von der Angebotsqualität; Mehrfachnennungen möglich;
grau: ≥ 10 ; Raster = regelmäßige Flächen (100-Meter, 500-Meter etc.)/Wohnstandorte/Wohnadressen; Punkte = punktförmige Ziele/zentrale Orte*

Angebotsqualität	Isochronen	Raster	Gemeinden	Punkte	Σ
Erschließung	11	3	8	0	22
Bedienung	0	0	11	5	16
Verbindung	0	4	9	18	31
Σ	11	7	28	23	69

Quelle: eigene Darstellung

Die Bewertung der Verbindungsqualität setzt das Vorhandensein von Start- und Zielpunkten voraus. Zielpunkte sind zumeist zentrale Orte oder wichtige Umsteigeknoten. Teilweise werden lediglich Mindestqualitäten für das Angebot zwischen zentralen Orten definiert (u. a. S₂, S₃, S₆). In anderen NVP werden aber auch maximale Reisezeiten und Umstiege zum nächsten Ober- oder Mittelzentrum festgelegt (u. a. M₂, M₃, M₄). Unklar ist jedoch, ob dieser Standard über Isochronen, Einwohnerzahlen auf Gemeindeebene oder bewohnte Rasterzellen zu bewerten ist. Gesicherte Aussagen hinsichtlich der benötigten Auflösung

des Raumbezugssystems lassen sich nur unter Berücksichtigung der bereits durchgeführten und dargestellten Erreichbarkeitsanalysen treffen.

Bewertungen

Wie in Tabelle 28 dargestellt, werden zumeist die Verbindungs- und die Bedienungsqualität einer Bestandsbewertung unterzogen. Die Darstellung erfolgt unter anderem über 53 Erreichbarkeitskarten und 77 Tabellen mit Erreichbarkeitswerten. Die für diesen Zweck durchgeführten Erreichbarkeitsanalysen basieren primär auf Gemeinden und Haltestellen (vgl. Tabelle 30). Raumbezugssysteme mit einer sehr hohen Auflösung (Rastermodelle, Punkte) sind in den verwendeten Erreichbarkeitsmodellen hingegen die Ausnahme.

Die Verwendung von Isochronen ist bei der Beurteilung der Erschließungsqualität besonders häufig. Im NVP von Neumünster (S5) erfolgt die kombinierte Darstellung von Isochronen und einem bewohnten 100-Meter-Raster (PTV Transport Consult GmbH 2017, S. 55). Gleichwohl wird die Qualität der Erschließung in keinem der untersuchten NVP auf Ebene eines kleinräumigen Rastermodells und unter Berücksichtigung von Realdistanzen bewertet. Im NVP von Lübeck (S4) werden zwar Haltestelleneinzugsbereiche auf Ebene von Realdistanzen dargestellt, eine Verschneidung mit der Wohnbevölkerung erfolgt jedoch nicht (IGES 2018, S. 108). Selbst die einfach zu berechnende Erschließungsqualität wird in der Regel nur für niedrig aufgelöste Raumbezugssysteme ermittelt. Dies ist gerade vor dem Hintergrund einer zumeist sehr guten Datenverfügbarkeit bemerkenswert.

Tabelle 30: Häufigkeit des räumlichen Bezugssystems bei der Bewertung

Kumuliert sind die in den NVP verwendeten Raumbezugssysteme in Abhängigkeit von der Angebotsqualität; Mehrfachnennungen möglich; grau: >= 10; Raster = regelmäßige Flächen (100-Meter, 500-Meter etc.)/Wohnstandorte/Wohnadressen; Punkte = punktförmige Ziele/zentrale Orte

Angebotsqualität	Isochronen	Raster	Gemeinden	Punkte	Haltestellen	unklar	Σ
Erschließung	14	5	11	0	3	1	34
Bedienung	2	1	74	0	6	1	84
Verbindung	3	1	79	4	22	4	113
Σ	19	7	164	4	31	6	231

Quelle: eigene Darstellung

Die Analyse der Bedienungsqualität erfolgt nahezu ausschließlich für Gemeinden und Haltestellen. Die wichtigsten Kriterien sind die Fahrtenhäufigkeit und der Anschluss einer Gemeinde an das öffentliche Verkehrssystem (u. a. S6, S8). In vielen NVP werden Bedienstandards formuliert, die anschließend auf Gemeindeebene einer Bewertung unterzogen und auf die Einwohnerzahl übertragen werden (u. a. N2, N6, N7). Eine kartographische Darstellung der Fahrtenhäufigkeit an Haltestellen erfolgt indes nur im NVP von Ostholstein (S6) (Kreis Ostholstein 2014, S. 60). Auch hier bleiben große Potenziale ungenutzt, da zumindest die Fahrtenhäufigkeiten und Bedienzeiten der standortscharfen Haltestellen von den Kommunen ermittelt werden können.

Etwa die Hälfte der durchgeführten Analysen bezieht sich auf die Verbindungsqualität. Diese wird nahezu ausschließlich mit Hilfe von Reiseaufwandsindikatoren bewertet. Kumulations- oder Potenzialindikatoren kommen hingegen nicht zum Einsatz. In 73,5 aller Anwendungen sind zudem ausschließlich zentrale Orte die berücksichtigte Zielkategorie. Dieser Befund steht in einem deutlichen Kontrast zur bereits vor rund 15 Jahren geforderten stärkeren Nutzung von Kumulationsindikatoren und lässt viele Potenziale der Erreichbarkeitsberechnung ungenutzt (Schwarze 2005, S. 47). In 79 Anwendungsfällen sind Gemeinden und in weiteren 22 Fällen Haltestellen die zugrundeliegenden Raumeinheiten. Die Verbindungsqualität auf Ebene von Gemeinden wird zumeist tabellarisch abgebildet (u. a. M4, N6, N7). Doch auch Erreichbarkeitskarten kommen in einigen Fällen zum Einsatz (M1, N3, N6, N8). Mitunter werden die Reisezeiten in nächste zentrale Orte auf Haltestellenebene ermittelt (VNO 2019, S. 65ff.). Häufiger ist jedoch die Verwendung von Reisezeitisochronen. Solche Darstellungen verwenden vor allem der NVP von Neumünster (S5) und der ILVP M-V (M1).

Die absolute Ausnahme ist die Verwendung hochaufgelöster Rastermodelle. Lediglich im ILVP M-V (M1) wird die Erreichbarkeit des nächsten Supermarktes auf Ebene eines 100-Meter-Rasters dargestellt (MEID MV 2018, S. 88). Diese Abbildung wurde indes nicht originär für den ILVP M-V erstellt, sondern aus dem Erreichbarkeitsportal der MRH entnommen (MRH o.J.a; Peter 2018).⁶⁶ Hier zeigt sich exemplarisch der Nutzen

66 http://geoportal.metropolregion.hamburg.de/mrh_erreichbarkeitsanalysen/# (letzter Zugriff: 17.05.2019)

regionaler Erreichbarkeitsmodelle in unterschiedlichen Anwendungsgebieten und für verschiedene Gebietskörperschaften. Dennoch ist zu betonen, dass gerade die Bewertung der Verbindungsqualität bisher nur auf einer sehr groben räumlichen Ebene erfolgt. Dabei zeigen die Ergebnisse in Kapitel 5, dass die Berechnung von Reiseaufwandsindikatoren auf Gemeindeebene umfangreichen Aggregationsfehlern unterworfen ist und gerade im ÖPNV keine zuverlässige Beurteilung der Erreichbarkeitsverhältnisse erlaubt.

Schlussfolgerungen zur räumlichen Auflösung in NVP

Die Auswertungen zeigen, dass Erreichbarkeitsindikatoren zumeist für niedrig aufgelöste räumliche Bezugssysteme ermittelt werden. Zu diesen gehören insbesondere Gemeinden und Haltestellen. Isochronen nehmen eine Sonderstellung ein, da sie in der Regel auf Haltestellen basieren, ihr Erschließungsgebiet aber gleichzeitig eine zusätzliche räumliche Auswertungsebene repräsentiert. Zudem reichen, im Unterschied zur Ermittlung von Reiseaufwandsindikatoren, eingeschränkte Verbindungsinformationen häufig nicht aus, um Isochronen zu berechnen.

In der Wissenschaft ist die Verwendung hochaufgelöster Rastermodelle mittlerweile üblich. In den untersuchten NVP konnten hingegen nur wenige Auswertungen identifiziert werden, die auf Rastermodellen oder Adressdaten basieren. Kommen diese zum Einsatz, dann in der Regel zur Bewertung der Erschließungsqualität. Die Analyse der Bedienungs- und Verbindungsqualität erfolgt nur in jeweils einem NVP rasterbasiert (S₅, M₁). Interessant ist außerdem, dass für den ILVP M-V (M₁) und den NVP von Nordwestmecklenburg (M₃) auf externe Dienstleister und Angebote zurückgegriffen wird, um Erreichbarkeitsdarstellungen in einer sehr hohen Auflösung zu produzieren (MEID MV 2018, S. 88; PBV & ETC 2015, S. 34). Die Bewertung der Verbindungsqualität erfolgt zumeist über Reisezeiten und Umstiege zu nächsten zentralen Orten. Einrichtungen der Daseinsvorsorge wie Supermärkte und Krankenhäuser sind nur in Einzelfällen Gegenstand der Bewertung (S₅, M₃). Die Erreichbarkeit von Hausärzten oder Schulen wurde in keinem NVP untersucht.

Bisher ist es nicht gelungen, Erreichbarkeitsmodelle mit einer hohen räumlichen Auflösung in die Nahverkehrsplanung zu integrieren. Zudem berücksichtigen alle im Rahmen der Aufstellung von NVP durchgeführten

Bewertungen nur wenige Gelegenheitstypen. Zwar werden in den NVP Ziele formuliert die für unterschiedliche Bevölkerungsgruppen relevant sind oder sich auf unterschiedliche Einrichtungen beziehen, gleichwohl existieren bestenfalls Ansätze zur adäquaten Würdigung dieser Zielkategorien bei der Bestandsanalyse. Die postulierte Lücke zwischen der praktischen Relevanz und dem tatsächlichen Einsatz von Erreichbarkeitsmodellen ist in der Nahverkehrsplanung offenkundig. Diese Diskrepanz ist umso erstaunlicher, da verschiedene Rastermodelle und Standortdaten öffentlicher Einrichtungen im Internet frei verfügbar sind.

Eine mögliche Ursache ist der fehlende Bedarf an detaillierten und aufwendig umzusetzenden Erreichbarkeitsanalysen. Und dies ungeachtet der potenziellen Einsatzgebiete. Diese Einschätzung wird durch die Beobachtung gestützt, dass viele NVP sogar auf relativ einfach durchzuführende Erreichbarkeitsanalysen verzichten. Zu diesen gehört beispielsweise die Berechnung der Einwohnerzahl in den Haltestelleneinzugsbereichen. Möglich ist aber auch, dass zwar ein Bedarf nach wesentlich genaueren Analysen besteht, die Landkreise und kreisfreien Städte aber nicht über die notwendigen Ressourcen verfügen, um diese Analysen durchzuführen oder zu beauftragen.

4.3.3 Modellierungsansatz

Auch der gewählte Modellierungsansatz ist entscheidend für die Nutzbarkeit von Erreichbarkeitsmodellen. Unter dem Modellierungsansatz werden sowohl die Detaillierung der Verkehrsgraphen als auch die für das Routing einzusetzende Software zusammengefasst. Die in den NVP formulierten Erreichbarkeitsstandards lassen sich mitunter direkt auf einen Modellierungsansatz übertragen. Wenn gefordert wird, dass alle Bewohner eines Kreises innerhalb von 400 Metern Realdistanz eine Haltestelle erreichen sollen, erfordert die Evaluierung das Routing auf einem Fußwegenetz. Basiert die Haltestellenanbindung indes auf Luftlinien oder unterbleibt die weitere Konkretisierung, kann ein geometrischer Puffer verwendet und auf den Aufbau eines Verkehrsgraphen verzichtet werden. Auch hier werden aus den NVP die zugrundeliegenden Berechnungsverfahren abgeleitet. Dabei werden vier Ansätze zur Berechnung von Raumwiderständen unterschieden (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Standards

Werden in den NVP Standards formuliert, lassen sich diese zumeist mit einfachen Mitteln evaluieren. So ist es möglich, 50 der 63 identifizierten Standards mit wenigen Verbindungs- oder einfachen GIS-Abfragen zu bewerten (vgl. Tabelle 31). Wenige Verbindungsabfragen sind vor allem nötig, um festgeschriebene Verbindungsqualitäten zwischen zentralen Orten zu evaluieren (u. a. S2, S6, M2). Beispielsweise definiert der Kreis Herzogtum Lauenburg (S3) minimale Fahrtenhäufigkeiten zwischen Ober-, Mittel- und Unterzentren sowie ländlichen Zentralorten (urbanus GbR 2014, S. 56). Es wäre mit einem geringen Zeitaufwand möglich, die notwendigen Verbindungsinformationen über webbasierte Auskunftssysteme abzurufen. Die Verankerung von Erschließungsstandards erfolgt in sieben von 18 Anwendungsfällen über Luftlinienweiten (u. a. V1, S7, S9). In sechs NVP sind wenige Abfragen ausreichend, um das Vorhandensein einer Haltestelle in jeder Gemeinde zu überprüfen (u. a. N2, N4, N8). Nur fünf Pläne definieren Standards, die das Routing auf einem NMIV-Verkehrsgraphen zur Haltestellenanbindung erfordern (u. a. S4, M2, M3).

Tabelle 31: Häufigkeit des Modellierungsansatzes bei der Festlegung von Standards

Kumuliert sind die in den NVP verwendeten Modellierungsansätze in Abhängigkeit von der Angebotsqualität. Mehrfachnennungen möglich, grau: ≥ 10

Angebotsqualität	wenige Abfragen	GIS	GIS mit Routing	ÖV-Modell	unklar	Σ
Erschließung	6	7	5	0	0	18
Bedienung	14	2	0	0	0	16
Verbindung	21	0	2	4	2	29
Σ	41	9	7	4	2	63

Quelle: eigene Darstellung

Wesentlich seltener werden Standards definiert, die sich nur mit fahrplanbasierten ÖV-Verkehrsgraphen überprüfen lassen. So nennen die NVP der Kreise Ostholstein (S6) und Cuxhaven (N1) eine maximale Reisezeit in das nächste Zentrum. Im NVP von Ostholstein werden außerdem Kriterien der Umsteige- und Bedienhäufigkeit festgelegt und im NVP von Cuxhaven das Reisezeitverhältnis zum MIV definiert (Kreis

Ostholstein 2014, S. 63ff.). Eine flächendeckende und für alle Einwohner repräsentative Evaluierung dieser Standards ist jedoch nur unter Verwendung eines ÖV-Verkehrsgraphen möglich, da aufgrund der notwendigen hohen Raumaufösung die Abfrage einzelner Verbindungsinformationen einen unverhältnismäßigen Aufwand erzeugt.

Insgesamt ist zu konstatieren, dass die definierten Angebotsqualitäten zumeist mit einfachen Mitteln und ohne ÖV-Verkehrsgraphen zu überprüfen sind. Muss zur Berechnung von Raumwiderständen doch auf Verkehrsgraphen zurückgegriffen werden, sind jeweils nur Reiseaufwandsindikatoren für wenige Ziele zu berechnen. Zu diesen gehören vor allem Ober- und Mittelzentren sowie Haltestellen. Gerade die Berechnung von Kumulationsindikatoren im ÖV und für hochaufgelöste Raumbezugssysteme würde den Aufwand von Erreichbarkeitsanalysen hingegen deutlich erhöhen.

Bewertungen

Bei der Verwendung unterschiedlicher Modellierungsansätze zur Bewertung der Angebotsqualität ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Zahlreiche Auswertungen (172) basieren auf wenigen Verbindungsabfragen oder wurden mit Hilfe einfacher Puffer (GIS) erstellt. Auf der anderen Seite basieren elf Auswertungen auf einem GIS-Routing und weitere 23 Analysen auf einem ÖV-Verkehrsgraphen. Wenige Verbindungsabfragen werden zumeist zur Bewertung der Verbindungsqualität eingesetzt (u. a. V1, S5, M4). Hingegen kommen einfache GIS-Werkzeuge zur Visualisierung geometrischer Haltestelleneinzugsbereiche zur Anwendung (u. a. S5, S7, M4). In den untersuchten NVP befinden sich 17 Erreichbarkeitskarten mit geometrischen Einzugsgebieten. Indes sind nur im NVP von Lübeck (S4) auf Realdistanzen basierende Einzugsgebiete dargestellt (IGES 2018, S. 108). Ein umfangreiches Routing auf einem MIV-Verkehrsgraphen wurde für den ILVP M-V (M1) durchgeführt. Auf Gemeindeebene sind unter anderem die MIV-Reisezeiten in nächstgelegene zentrale Orte und die Gehzeiten zu Haltestellen dargestellt (MEID MV 2018, S. 21).

In vier NVP sind Auswertungen enthalten, die mit Hilfe eines ÖV-Verkehrsgraphen erstellt wurden (S5, M1, M3, N1). Klassische ÖV-Erreichbarkeitskarten unter Berücksichtigung explizit genannter Zeitfenster sind in den NVP von Neumünster (S5) und Cuxhaven (N1) sowie

im ILVP M-V (M1) enthalten. Im NVP von Neumünster sind Reisezeitisochronen für unterschiedliche Gelegenheitstypen (ZOB, Krankenhaus, Tierpark) auf Ebene von Haltestellen abgebildet (PTV Transport Consult GmbH 2017, S. 35, 36). Im NVP von Cuxhaven ist die Erreichbarkeit der zentralen Orte an einem Schultag zwischen 06:00 Uhr und 08:15 Uhr dargestellt (VNO 2019, S. 65ff.). Grundlage dieser Analysen ist jeweils ein monomodaler ÖV-Verkehrsgraph ohne Berücksichtigung der fußläufigen Haltestellenanbindung und der SWZ. Einzig im NVP des Landkreises Nordwestmecklenburg (M3) und im ILVP M-V (M1) sind Reisezeiten des ÖPNV abgebildet, die ausdrücklich auch die Anbindungszeiten sowie eine SWZ enthalten. Auffällig ist jedoch, dass alle Erreichbarkeitsanalysen unter Verwendung eines ÖV-Verkehrsgraphen von spezialisierten externen Dienstleistern durchgeführt wurden. In den Landkreisen Nordwestmecklenburg (M3) und Cuxhaven (N1) konnte auf Analysen aus anderen Projektkontexten zugegriffen werden (VNO 2019, S. 17). Ein solcher Transfer kann den notwendigen finanziellen Aufwand erheblich reduzieren. So wurde u. a. der NVP für Neumünster (S5) von einem auf Modellierungssoftware spezialisierten Dienstleister erstellt (PTV Transport Consult GmbH).

Tabelle 32: Verwendete Modellierungsansätze bei der Erreichbarkeitsberechnung

Kumuliert sind die in den NVP verwendeten Modellierungsansätze in Abhängigkeit von der Angebotsqualität. Mehrfachnennungen möglich, grau: ≥ 10

Angebotsqualität	wenige Abfragen	GIS	GIS mit Routing	ÖV-Modell	unklar	Befragung	Σ
Erschließung	0	15	3	0	9	4	31
Bedienung	75	2	0	3	4	0	84
Verbindung	80	0	8	20	4	3	115
Σ	155	17	11	23	17	7	230

Quelle: eigene Darstellung

Bei der Erarbeitung von fünf NVP kamen auch Befragungen zur Anwendung, die sich unmittelbar auf die Angebotsqualitäten beziehen (u. a. S2, S8, S10). Eine solche Erhebung wurde beispielsweise in Dithmarschen (S2) mit 125 kommunalen Verwaltungen zur Bewertung des ÖPNV

durchgeführt (urbanus GbR & SVG 2014, S. 94). Es geht also nicht um die gemessene, sondern die wahrgenommene Angebotsqualität. Im NVP von Lüneburg (N₅) erfolgt die Bewertung des ÖV-Angebotes über einen Vergleich mit anderen Kommunen ähnlicher Struktur (VNO 2018a, S. 61ff.). Der Vergleich basiert jedoch ausschließlich auf deskriptiven Auswertungen und ohne einen räumlichen Bezug (Anzahl der Linien, Fahrtenhäufigkeiten). In einigen NVP werden zwar Aussagen zur Angebotsqualität getroffen, unklar bleibt jedoch, auf welcher Modellgrundlage diese basieren (u. a. M₁, S₄, S₇). Der NVP des Kreises Steinburg (S₉) nennt beispielsweise Defizite in der Bedienungsqualität, legt aber keine Berechnungsgrundlage offen (urbanus GbR & SVG 2017, S. 89).

Fünf NVP enthalten unterschiedlich detaillierte Nachfrageprognosen (u. a. S₁, S₆, M₃). Die Nachfrageberechnung mit einem Verkehrsmodell erfolgte jedoch nur für den LNVP von Schleswig-Holstein (Intraplan GmbH) und den NVP von Nordwestmecklenburg (PTV Transport Consult GmbH). In den übrigen Fällen wurde die zukünftige Nachfrage lediglich aus der erwarteten Bevölkerungsentwicklung abgeleitet. Auch hier zeigt sich, dass komplexe Berechnungsverfahren nur in Ausnahmefällen zur Anwendung gelangen und bei der Bewertung der Angebotsqualität auf einfach zu ermittelnde Erreichbarkeitsindikatoren zurückgegriffen wird.

Schlussfolgerungen zum Modellierungsansatz in NVP

In den Auswertungen wird deutlich, dass die durchgeführten Bewertungen der Angebotsqualität in der Regel auf einfachen Modellierungsverfahren beruhen. So wird die Erschließungsqualität nach wie vor zumeist auf Basis von Luftliniendistanzen bewertet. Dies ist insofern konsequent, als das sowohl von der FGSV als auch dem VDV die Einzugsbereiche von Haltestellen über Luftlinien definiert werden (FGSV 2010, S. 6; VDV 2019, S. 15). Gleichzeitig bleibt die Möglichkeit ungenutzt, die realen Einzugsbereiche mit Hilfe etablierter Software und unter Nutzung frei verfügbarer Fußwegenetze zu berechnen. Zumal auch die FGSV betont, dass Realdistanzen in Abhängigkeit von der räumlichen Situation zu wesentlich genaueren Ergebnissen führen können (FGSV 2014, S. 23ff.).

Werden die Raumwiderstände für einzelne Gelegenheitstypen berechnet, dann zumeist für einzelne zentrale Orte und auf wenigen Relationen. In diesen Fällen ist es möglich, die notwendigen Verbindungsinformationen aus einem Beauskunftungssystem oder einem Fahrplanbuch zu ermitteln. Analysen die ein größeres Fachwissen voraussetzen und insbesondere den Umgang mit Spezialsoftware erfordern, werden ausschließlich von externen Dienstleistern durchgeführt. Vermutlich sind die Fachverwaltungen der Aufgabenträger auch aufgrund fehlender Ressourcen bisher nicht in der Lage, um Routings im IV oder ÖV eigenständig durchzuführen. Die Aufgabenträger verfolgen zwei Ansätze, um dennoch Zugriff auf hochaufgelöste und detaillierte ÖV-Erreichbarkeitsanalysen zu bekommen. Eine Möglichkeit ist die Beauftragung externer Dienstleister. Gleichwohl ist davon auszugehen, dass den Aufgabenträgern dann hohe Kosten entstehen. Eine weitere Möglichkeit ist der in den Landkreisen Nordwestmecklenburg (M3) und Cuxhaven (N1) praktizierte Zugriff auf Erreichbarkeitsanalysen aus anderen Projekten. Diese Projekte wurden entweder mit Bundesmitteln (Cuxhaven) oder Gemeinschaftsmitteln der MRH (Nordwestmecklenburg) gefördert. Gleichwohl wurden die verwendeten Analysen nicht explizit für den NVP entwickelt und ihr Vorhandensein ist im Rahmen ihrer Neuaufstellung nicht garantiert.

4.4 Schlussfolgerungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde der Umgang mit Erreichbarkeit bei der Aufstellung von NVP untersucht und die Detaillierung der durchgeführten Erreichbarkeitsanalysen ermittelt. Die Ergebnisse liefern wichtige Hinweise für die räumliche Auflösung und die Netzdetailierung zukünftiger regionaler Erreichbarkeitsmodelle. Das in Kapitel 3 vorgestellte regionale Erreichbarkeitsmodell der MRH geht über die in den NVP adressierte Modelldetaillierung deutlich hinaus. Mit dem Modell der MRH wäre es möglich, hochaufgelöste Erreichbarkeiten für unterschiedliche Wegezwecke und Bevölkerungsgruppen zu berechnen. Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

Uneinheitlicher Umgang mit Zielen, Standards und Bewertungen

In NVP wird Erreichbarkeit über Ziele, Standards und Bewertungen regelmäßig adressiert. Gleichwohl ist die konsequente Übersetzung von Zielen in Standards bisher noch die Ausnahme. Zudem werden die formulierten Angebotsstandards häufig nicht im Rahmen der Bestandsanalyse bewertet. Dies gilt ebenfalls für die in den NVP vorgeschlagenen Maßnahmen. Insofern ist der Umgang mit Erreichbarkeit zwar etabliert, einen strukturierten Einsatz gibt es bisher aber nicht. Auch in einer Untersuchung vom BMVBS wurde bereits vor rund zehn Jahren die nicht immer konsequente Ableitung von Standards hervorgehoben (BMVBS 2010b, S. 25ff.). Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch die Analyse der NVP der ehemals 30 hessischen Landkreise. Demnach werden gerade in NVP von Landkreisen außerhalb der Verdichtungsräume häufig keine Standards der Angebotsqualität formuliert (Winter 2005, S. 85ff.). Gerade bei der Bedienungshäufigkeit ist die fehlende Formalisierung besonders häufig (ebd., S. 90). Darüber hinaus zeigt sich sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene die bevorzugte Operationalisierung des Systemzugangs (Proffitt *et al.* 2019, S. 185, Winter 2005, S. 86). Alle Ergebnisse decken sich mit der von Silva *et al.* (2017a, S. 143) ermittelten fehlenden Formalisierung von Erreichbarkeit in der Planungspraxis (vgl. Abschnitt 1.3.2).

Verwendung einer geringen räumlichen Auflösung

In der Regel wird auf niedrig aufgelöste Raumbezugssysteme bei der Erreichbarkeitsberechnung zurückgegriffen. Zu diesen gehören insbesondere Gemeinden und nicht näher spezifizierte zentrale Orte. Auch das Haltestellennetz wird immer wieder als Bewertungsgrundlage herangezogen. Bedeutsame Einrichtungen der Daseinsvorsorge (Schulen, Ärzte etc.) spielen indes keine Rolle, obwohl die Sicherung der Daseinsvorsorge betont und im Regionalisierungsgesetz (§ 1 Abs. 1 RegG) festgeschrieben wird. Detaillierte Raumbezugssysteme wie Hektarraster oder Adressen kommen nur in Ausnahmefällen zur Anwendung. Hier zeigt sich eine große Lücke zwischen den bereits entwickelten und den tatsächlich eingesetzten Erreichbarkeitsmodellen. Die Gründe für den seltenen Einsatz hochaufgelöster Raumbezugssysteme sind nicht zu ermitteln. Denkbar sind u. a. die begrenzte Datenverfügbarkeit und der

hohe Aufwand beim Umgang mit großen Datenmengen. Zudem erfordert eine hohe Auflösung auch den Einsatz detaillierter Verkehrsgraphen und besonderer Routingverfahren.

Abfrage und Berechnung von einfachen Raumwiderständen

Der Einsatz von Routingalgorithmen und fahrplanbasierten ÖV-Verkehrsgraphen für die Bestandsanalyse in NVP ist bisher die Ausnahme. Entsprechend kommen zahlreiche anwenderorientierte Erreichbarkeitsindikatoren in der Planungspraxis nur in Einzelfällen zur Anwendung. In diesen Fällen werden die Erreichbarkeitsmodelle ausschließlich von externen und spezialisierten Dienstleistern entwickelt und eingesetzt. Es wird deutlich, dass Fachverwaltungen und möglicherweise auch zahlreiche Planungsbüros bisher nicht über das notwendige Know-how verfügen, um Erreichbarkeitsanalysen auf detaillierten und intermodalen ÖV-Verkehrsgraphen durchzuführen. In der Regel werden sich auf einzelne Verbindungsinformationen stützende und entsprechend einfach zu realisierende Auswertungen vorgenommen. GIS werden überwiegend zur Berechnung von Haltestelleneinzugsgebieten auf Basis von Luftlinien verwendet. Die Berechnung von Einzugsgebieten über Realdistanzen ist indes die Ausnahme. Auch auf die Berechnung von Fahrpreisen wird in allen NVP verzichtet. Diesem Verzicht liegt vermutlich auch das Fehlen geeigneter Berechnungsverfahren zugrunde. So zeigt der Vergleich unterschiedlicher wissenschaftlicher Studien, dass die Berechnung von Fahrpreisen in der Erreichbarkeitsmodellierung die Ausnahme ist (vgl. Abschnitt 2.3.3.3). Auch das in dieser Arbeit entwickelte regionale Erreichbarkeitsmodell ermöglicht nicht die Fahrpreisberechnung (vgl. Abschnitt 3.7). Die Nichtbeachtung der Kosten innerhalb der NVP bedeutet also nicht, dass ihre Relevanz grundsätzlich in Frage steht. Die Bewertung der Angebotsqualitäten basiert ausschließlich auf Reiseaufwands- oder infrastrukturbasierten Erreichbarkeitsindikatoren. Die in der Wissenschaft üblicherweise eingesetzten Kumulations- und Potenzialindikatoren kommen dagegen nicht zur Anwendung (vgl. Abschnitt 2.1.3.2).

Das Potenzial regionaler Modelle in der Daseinsvorsorgeplanung

Obwohl die Erreichbarkeit von Gelegenheiten für die Sicherstellung der Daseinsvorsorge von entscheidender Bedeutung ist, kommen Erreichbarkeitsanalysen in der Nahverkehrsplanung bisher kaum zum Einsatz. Von der zentralisierten Bereitstellung regionaler Erreichbarkeitsmodelle könnte die Daseinsvorsorgeplanung jedoch erheblich profitieren. Eine solche Zentralisierung würde die aufzubringenden Ressourcen jeder einzelnen Gebietskörperschaft wesentlich reduzieren und den Einsatz hoch aufgelöster Modelle überhaupt erst ermöglichen. Die Zentralisierung würde es auch erleichtern, das nötige Know-how zu sammeln und zu sichern sowie eine hohe Vergleichbarkeit bei der Erreichbarkeitsberechnung zu gewährleisten. Am Beispiel des Vereinigten Königreiches (UK) wurde bereits gezeigt, dass die zentralisierte Bereitstellung von standardisierten Standort- und Netzdaten durch einen öffentlichen Träger möglich ist (vgl. Abschnitt 1.4.2). Die Analysen haben außerdem gezeigt, dass öffentliche Planungsgesellschaften an der Aufstellung von NVP häufig beteiligt sind. So ist die VNO im Bundesland Niedersachsen für die Erarbeitung von acht NVP federführend verantwortlich. Diese ohnehin etablierte Konstellation liefert einen möglichen Anknüpfungspunkt für den zukünftigen Aufbau eigener regionaler Erreichbarkeitsmodelle.

Da die Integration von Erreichbarkeitsmodellen in die Planungspraxis häufig auch an der fehlenden Formalisierung von Erreichbarkeitskriterien scheitert, sollten bundeseinheitliche Standards hinsichtlich der Erreichbarkeitsberechnung aufgestellt werden. Solche Standards oder Verfahren ließen sich dann in ein regionales Erreichbarkeitsmodell übersetzen und auf unterschiedliche Teilregionen anwenden. Ein solches Vorgehen würde eine hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse garantieren und den Aufwand bei der Modellerstellung reduzieren.

Bedarf an Modellierungsansätzen zur Bewertung alternativer Bedienformen

Obwohl alternative Bedienformen (AST, Rufbusse etc.) im Rahmen dieser Analysen nicht gesondert betrachtet wurden, ist ihre besondere Stellung in den NVP zur Ausweitung oder Sicherstellung des aktuellen ÖPNV-Angebotes dennoch hervorzuheben. Gleichzeitig ist die vollständige Integration dieser Angebote in regionale Erreichbarkeitsmodelle

bisher nicht gelungen. Da einigen Angeboten weder Fahrpläne noch Haltestellen zugrunde liegen, wird bisher mit weitgehenden Vereinfachungen und Annahmen operiert (vgl. Abschnitt 3.5.1). Notwendig ist ein einheitlicher und gleichsam nutzbarer Modellierungsansatz.

5 Die räumliche Auflösung von Erreichbarkeitsmodellen

Wie beeinflusst die räumliche Auflösung die Genauigkeit von Erreichbarkeitsmodellen unter besonderer Berücksichtigung multimodaler Verkehrsgraphen?

In diesem Kapitel wird dargestellt, inwiefern die Auflösung von Raumbezugssystemen, der Aufbau von Erreichbarkeitsindikatoren und der Umgang mit unterschiedlichen Verkehrsgraphen die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen beeinflussen. Das in Kapitel 3 vorgestellte regionale Erreichbarkeitsmodell mit einem bewohnten 100-Meter-Raster dient als Referenz. Es wird davon ausgegangen, dass die mit diesem Modell berechneten Erreichbarkeitswerte den Realbedingungen entsprechen. Anschließend werden für unterschiedliche Modellvereinfachungen die Auswirkungen auf die Ergebnisgenauigkeit untersucht. Die Analysen erfolgen unter Verwendung des Variationskoeffizienten (VarK) (Abschnitt 5.1). Mit diesem ist es unter anderem möglich, die Streuung der im bewohnten 100-Meter-Raster (Referenzsystem) berechneten Reisezeiten zum nächsten Supermarkt innerhalb geringer aufgelöster Raumbezugssysteme zu bestimmen. Weisen die für das bewohnte 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten innerhalb einer Gemeinde eine große Streuung auf, erzeugt die Verwendung des bewohnten 100-Meter-Rasters einen hohen Informationsgewinn. Sind die Reisezeiten weitgehend identisch, ist der Informationsgewinn entsprechend gering.

Die Untersuchung beginnt mit einem Vergleich unterschiedlich aufgelöster Raumbezugssysteme für geometrische und einwohnergewichtete Zentroide (Abschnitt 5.2). Anschließend werden der Einfluss der Detaillierung von Verkehrsgraphen (Abschnitt 5.3) und der Aufbau von Erreichbarkeitsindikatoren (Abschnitt 5.4) auf die Genauigkeit von Erreichbarkeitsmodellen untersucht. Schließlich erfolgen die Synthese der wesentlichen Ergebnisse und die Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen (Abschnitt 5.5).

5.1 Eine Methode zur Bestimmung von Aggregationsfehlern

Das Hauptziel der räumlichen Aggregation ist die Reduktion der räumlichen Einheiten. In Erreichbarkeitsmodellen ist aber die Repräsentativität der berechneten Erreichbarkeit gegenüber allen Bewohnern innerhalb der Raumeinheiten zu gewährleisten. Am Beispiel des in Kapitel 3 vorgestellten Erreichbarkeitsmodells der MRH erfolgt der Einsatz unterschiedlicher Messverfahren zur Wirkungsabschätzung einzelner Modellparameter auf die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen. Die Erreichbarkeitswerte im 100-Meter-Raster dienen als Referenzwert (vgl. Abschnitt 5.1.2). In Tabelle 33 sind alle Untersuchungsfälle aufgeführt, für die die Aggregationsfehler in Abhängigkeit vom Referenzsystem ermittelt werden. So kann unter anderem untersucht werden, ob Aggregationsfehler vom Verkehrsmodus abhängen oder ob die Einwohnergewichtung von Zentroiden die Genauigkeit von Erreichbarkeitsmodellen erhöht.

Tabelle 33: Aggregationsfehler und Modellparameter

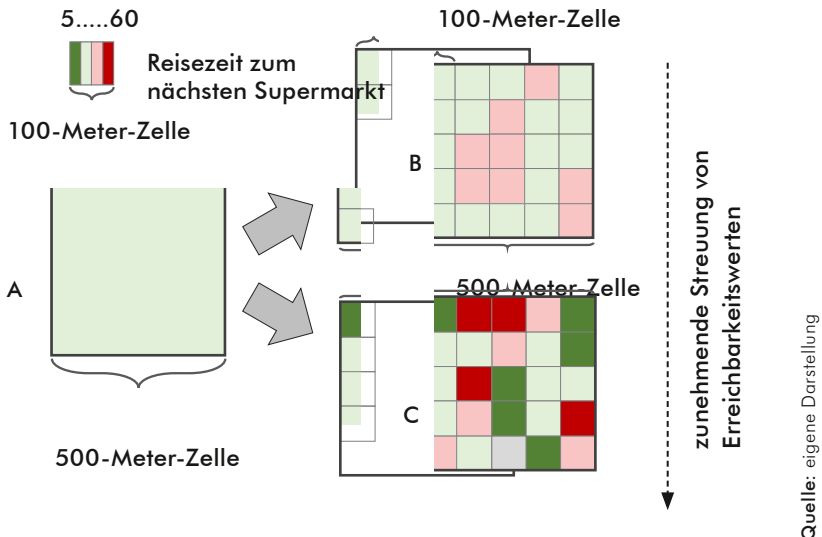
Untersuchungsfälle	Parameter
Verkehrsmodi	MIV, Fuß, Rad, ÖV
Indikatoren	Reiseaufwandsindikator, Kumulationsindikator, Potenzialindikator
Gelegenheitstypen	Bildung, Gesundheit, Einkauf, Arbeit, Freizeit, Verkehrsinfrastruktur, zentrale Orte
Vergleichssysteme	
Raumbezugssysteme	500-Meter, 1-Kilometer, 5-Kilometer, Gemeinden, statistische Gebiete
Zentroide	geometrisch, einwohnergewichtet

Quelle: eigene Darstellung

5.1.1 Der Variationskoeffizient als Streuungsmaß

Der Nutzen einer hohen räumlichen Auflösung entspricht der Minderung von Aggregationsfehlern (vgl. Abschnitt 2.2.3). Diese Fehler resultieren aus dem Wirken des Zentroidproblems, des Eigenpotenzialproblems und des Grenzproblems (vgl. Abschnitt 2.2.3.3). Es stellt sich jedoch die Frage, bis zu welcher Auflösung diese Fehler eine Wirkung entfalten. Die Wirkung ist besonders ausgeprägt, wenn disaggregierte Erreichbarkeitswerte eine hohe Streuung aufweisen. Abbildung 35 zeigt zwei mögliche Streuungen von Erreichbarkeitswerten innerhalb einer 500-Meter-Zelle und auf Ebene eines 100-Meter-Rasters. Bei der Verwendung eines 500-Meter-Rasters könnte lediglich ein Erreichbarkeitswert ausgegeben werden (A). Eine höhere Auflösung würde jedoch nur wenige zusätzliche Informationen liefern, wenn die Einzelwerte eine geringe Streuung aufweisen (B). Liegen die Erreichbarkeitswerte jedoch weit auseinander, ist der Umfang zusätzlicher Informationen entsprechend hoch (C).

Abbildung 35: Quantifizierung von Aggregationsfehlern in Erreichbarkeitsmodellen



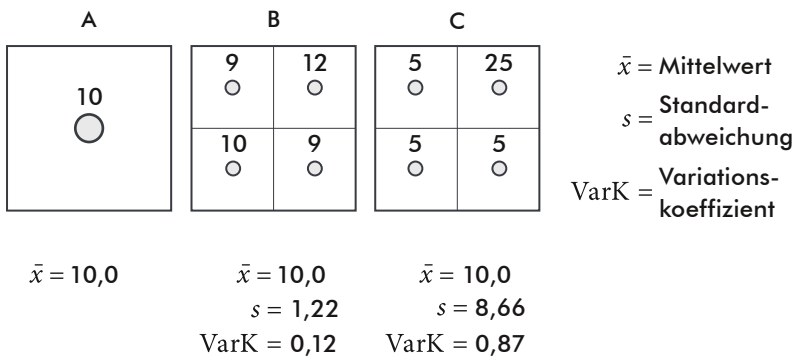
Quelle: eigene Darstellung

Der zentrale Untersuchungsgegenstand ist die Streuung von Erreichbarkeitswerten auf Ebene des 100-Meter-Rasters innerhalb geringer aufgelöster Raumeinheiten. Zwar wurden in der Vergangenheit einige Untersuchungen durchgeführt, um Aggregationsfehler in der Erreichbarkeitsmodellierung zu quantifizieren, gleichwohl weisen diese erhebliche Lücken auf (Dalvi & Martin 1976; Hewko et al. 2002; Stępniaak & Rosik 2015). Ein Mangel besteht insbesondere im Umgang mit Erreichbarkeitsunterschieden und der Streuung von Erreichbarkeitswerten. Wie Abbildung 36 zeigt, kann die mittlere Erreichbarkeit dem Referenzwert in einem stärker aggregierten Raumbezugssystem entsprechen und gleichzeitig zu erheblichen Informationsverlusten führen. Um den zusätzlichen Informationsgewinn bei Verwendung einer höheren Auflösung vollständig zu erfassen, wird die *gewichtete durchschnittliche Abweichung von Erreichbarkeitswerten bezogen auf einen Referenzwert* über den VarK ermittelt (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Mit dem VarK wird die Standardabweichung über ihr Verhältnis zum Mittelwert einer Verteilung normiert (Wieland & Dittrich 2016, S. 16). Mit der Standardabweichung allein kann die Streuung einer Verteilung nicht korrekt eingeordnet werden, da sie sich nicht am absoluten Mittelwert orientiert. Die Standardabweichung einer Verteilung ist

Abbildung 36: Die Streuung von Einzelwerten gegenüber dem mittleren Referenzwert

Dargestellt ist eine exemplarische Verteilung von Erreichbarkeitswerten.



Quelle: eigene Darstellung

die mittlere gewichtete Abweichung ihrer Einzelwerte vom Mittelwert. Die Gewichtung ergibt sich aus dem Quadrieren absoluter Abweichungen vom Mittelwert als Teil der Varianz (vgl. Gleichung 7).

Gegeben sei eine Verteilung $y = \{1, 2, 2, 4, 4, 5\}$ mit dem Mittelwert $\bar{x}_y = 3$. Die Einzelwerte weichen im Durchschnitt um $d_{\bar{x}}(y) = 1,3$ vom Mittelwert ab. Aufgrund der relativ stärkeren Gewichtung hoher Abweichungen liegt die Standardabweichung jedoch bei $s_y = 1,414$. Werden alle Werte beispielsweise mit 20 addiert, ergibt sich eine neue Verteilung $z = \{21, 22, 22, 24, 24, 25\}$ mit $\bar{x}_z = 23$. Da die Standardabweichung jedoch ausschließlich die gewichteten Abweichungen vom Mittelwert berücksichtigt, bleibt diese konstant $s_z = 23$ bei. Entscheidend ist der VarK, also das Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert (vgl. Gleichung 8). Dieser ist von $VarK_y = 0,47$ von auf $VarK_z = 0,06$ deutlich zurückgegangen. Auf Raumwiderstände übertragen bedeutet dies, dass eine Abweichung von drei Minuten bei fünf Minuten Gesamtreisezeit einen höheren Stellenwert besitzt, als eine identische absolute Abweichung bei einer Reisezeit von einer Stunde. Der VarK ermöglicht also die Beurteilung der relativen Streuung einer Verteilung, indem er die Standardabweichung ins Verhältnis zum Mittelwert setzt. Je höher der VarK, desto stärker ist die relative Abweichung der Einzelwerte einer Verteilung vom Mittelwert. Bei einem $VarK < 1$ liegt die Standardabweichung unter dem Mittelwert, bei einem $VarK > 1$ entsprechend darüber. Der VarK ist eine dimensionslose Einheit und es existiert kein festgelegter Wert, bis zu welchem der VarK als akzeptabel angenommen werden kann. Vielmehr ist der Grenzwert in Abhängigkeit vom Untersuchungsgegenstand zu bestimmen.

Gleichung 7

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{x}_y)^2}{n}}$$

s_y = Standardabweichung einer Verteilung y

\bar{x}_y = Mittelwert einer Verteilung y

y_i = Wert i einer Verteilung y

Gleichung 8

$$\text{VarK}_y = \frac{s_y}{\bar{x}_y}$$

VarK_y = Variationskoeffizient einer Verteilung y

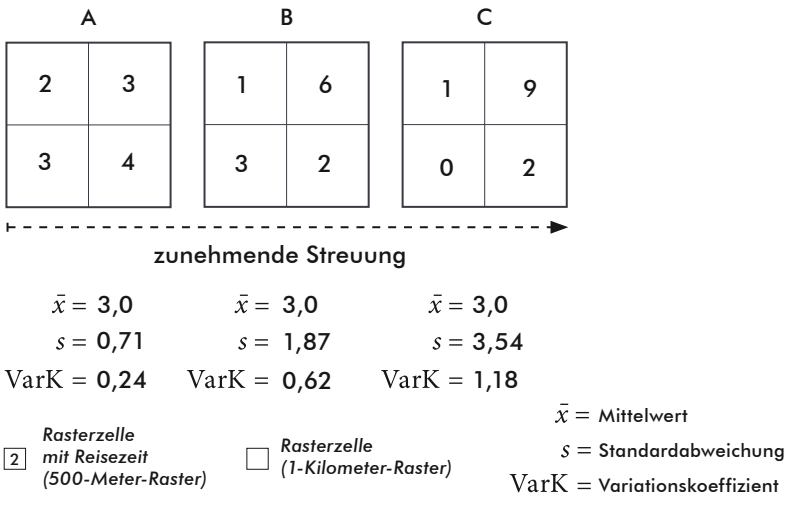
\bar{x}_y = Mittelwert einer Verteilung y

s_y = Standardabweichung einer Verteilung y

Da die räumliche Aggregation zu einer Glättung numerischer Werte innerhalb von Raumeinheiten führt, können mögliche Aggregationsfehler über die Variation dieser Werte bestimmt werden (Dark & Bram 2007; Openshaw 1984). Abbildung 37 zeigt eine fiktive Verteilung von Reisezeiten zum nächsten Supermarkt auf Rasterebene. Jeweils vier dieser Rasterzellen sollen zu einer nächstgrößeren Raumeinheit aggregiert werden. Dies bedeutet auch, dass vier Interaktionspaare (500-Meter-Raster <-> Supermarkt) nur noch vom Interaktionspaar (1-km-Raster <-> Supermarkt) repräsentiert werden. Die Repräsentativität ist besonders hoch, wenn die aggregierten Werteausprägungen eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Bei einer starken Streuung gehen jedoch wichtige Verbindungsinformationen verloren. Im Beispiel A liegen die Reisezeiten dicht beieinander und der VarK ist mit 0,24 entsprechend gering. Die Reisezeiten in den Beispielen B und insbesondere C weisen indes wesentlich größere Streuungen auf, die den Mittelwert mitunter übersteigen (Beispiel C: 1,18). Mit Zunahme des VarK besitzt der Erreichbarkeitswert der aggregierten Raumeinheit folglich eine immer geringere Repräsentativität gegenüber den tatsächlichen Erreichbarkeitsverhältnissen.

In räumlichen Analysen wird immer wieder auf VarK zurückgegriffen, um räumliche Disparitäten zu quantifizieren (Küpper & Peters 2019; Leßmann 2005; Maretzke 2010). Als Disparität wird das »*Ausmaß der regionalen Unterschiede (Streuung) der Werte eines Indikators zu einem bestimmten Zeitpunkt*« verstanden (Küpper & Peters 2019, S.IX). Der VarK dient beispielsweise zur Messung regionaler Abweichungen bei den Arbeitslosenquoten, beim Bruttoinlandsprodukt oder der Wahlbeteiligung in Deutschland (ebd., S.XV).

Abbildung 37: Der Variationskoeffizient und die interne Homogenität



Quelle: eigene Darstellung nach Dark & Bram (2007, S. 473)

Auch in einzelnen Erreichbarkeitsuntersuchungen sind VarK bereits zur Anwendung gekommen. Hervorzuheben ist die am Beispiel von Tel Aviv durchgeführte Arbeit von Benenson et al. (2017b). Sie untersuchten die Auswirkungen einer hohen räumlichen Auflösung auf die Genauigkeit eines Kumulationsindikators (vgl. auch Abschnitt 2.1.3.2). Mit dem VarK wurde die relative Streuung von Erreichbarkeitswerten auf Gebäudeebene innerhalb von Verkehrszellen bestimmt. Sie argumentieren, dass eine hohe relative Streuung zu einem erheblichen Erkenntnisgewinn bei Verwendung von Gebäudedaten führt. Die Variation zwischen Erreichbarkeitswerten auf Gebäudeebene nimmt mit der Größe der Verkehrszellen zu und mit dem Umfang des Reisebudgets ab (ebd., S. 228). Hervorgehoben wird die Bedeutung der kleinräumigen Modellierung für den ÖPNV, da die fußläufigen Haltestellenzugänge eine im Vergleich zum MIV wesentlich höhere räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten erzeugen (ebd., S. 215). Sie betonen aber auch, dass bei einem Zeitbudget von 15 Minuten nicht allein die Haltestellenanbindung für die Variation verantwortlich ist, sondern erhebliche Unterschiede in den ÖPNV-Reisezeiten (ebd., S. 227, 228). Der ÖPNV-Verkehrsgraph umfasst

jedoch ein sehr kurzes Startzeitfenster (07:15 – 07:30) und eine einfache Haltestellenanbindung von lediglich 400 Metern. Außerdem wurde auf eine taktabhängige Bestimmung der SWZ verzichtet (ebd., S. 220). Eine Differenzierung zwischen verschiedenen räumlichen Auflösungen, Verkehrsmodi und Erreichbarkeitsindikatoren erfolgte nicht.

Stępniaik & Goliszek (2017) und Owen & Levinson (2015) nutzen den VarK, um die Variation der im Tagesverlauf mit öffentlichen Verkehrsmitteln erreichbaren Arbeitsplätze zu bestimmen. In diesem Zusammenhang steht ein hoher VarK für ein im Tagesverlauf stark schwankendes Angebot. Dieses zeigt sich gerade in den Randgebieten deutlich und wird auf die Taktausdünnung in Tagesrandlage (Stępniaik & Goliszek 2017, S. 253ff.) oder ein gestuftes Angebot mit Expresslinien zurückgeführt (Owen & Levinson 2015, S. 116). Im NMIV treten hingegen keine Schwankungen auf, da die verwendeten Modelle keine tageszeitlichen Geschwindigkeitsunterschiede abbilden.

5.1.2 MRE – Die mittlere Referenzerreichbarkeit

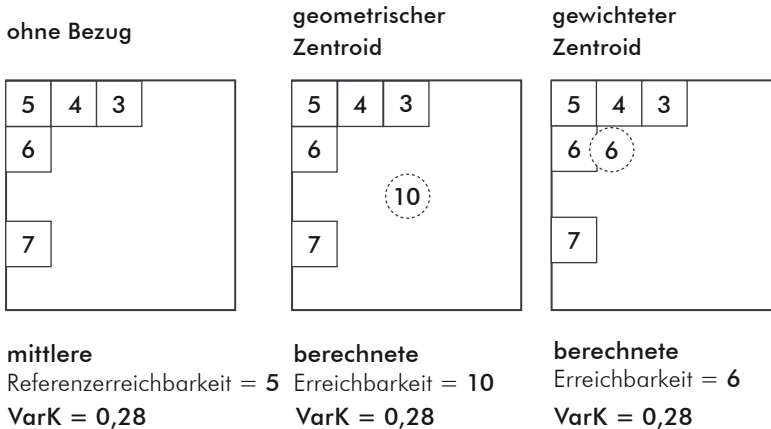
Die Quantifizierung von Aggregationsfehlern erfolgt mit Hilfe der *mittleren Referenzerreichbarkeit* (MRE). Diese entspricht der durchschnittlichen Erreichbarkeit im Referenzsystem innerhalb einer Raumeinheit des Vergleichssystems. Als Referenzsystem dient das bewohnte 100-Meter-Raster. Es wird unterstellt, dass die Verwendung einer noch höheren Auflösung auf regionaler Ebene weder praktikabel noch inhaltlich sinnvoll ist (vgl. Abschnitt 1.2.4). Als Vergleichssysteme kommen die in Tabelle 33 aufgeführten Raumbezugssysteme zum Einsatz. Die Berechnung der Erreichbarkeitswerte erfolgt für unterschiedliche Verkehrsmodi, Indikatoren und Gelegenheitstypen. Darüber hinaus erfolgt ein Vergleich zwischen geometrischen und einwohnergewichteten Zentroiden.

In Abbildung 38 ist die fiktive Verteilung von Erreichbarkeitswerten innerhalb einer 500-Meter-Zelle dargestellt. Die MRE ist der Durchschnitt dieser Erreichbarkeitswerte im bewohnten 100-Meter-Raster und somit ihre bestmögliche Repräsentation (vgl. Gleichung 9). Erreichbarkeiten werden mit dem Ziel berechnet, eine möglichst hohe Repräsentativität gegenüber den Erreichbarkeitsverhältnissen an den einzelnen Standorten zu erzielen. Folglich sollten die im Vergleichssystem

berechneten Werte der MRE möglichst nahekommen. Im dargestellten Fall beträgt die MRE fünf, die für einen geometrischen Zentroiden im Vergleichssystem berechnete Erreichbarkeit beträgt zehn, der für einen einwohnergewichteten Zentroiden ermittelte Wert hingegen sechs. Gleichwohl hängt von der Streuung der Einzelwerte ab, ob ein einzelner Wert überhaupt eine hohe Repräsentativität erzielen kann (vgl. Abschnitt 5.1.3). Die Standardabweichung der Einzelwerte beträgt im vorgestellten Beispiel 1,41. Daraus ergibt sich ein VarK von 0,28. Je höher die Standardabweichung der Einzelwerte gegenüber der MRE, desto weniger repräsentiert die MRE die tatsächlichen Erreichbarkeitsverhältnisse und desto schwieriger ist es, diese in geringer aufgelösten Vergleichssystemen abzubilden. In den nachfolgenden Abschnitten werden unterschiedliche Messverfahren vorgestellt, um die Repräsentativität von Erreichbarkeitswerten gegenüber der MRE zu bewerten.

Abbildung 38: Mittlere Referenzerreichbarkeit und berechnete Erreichbarkeiten

Dargestellt ist eine exemplarische Verteilung von Erreichbarkeitswerten



5 100-Meter-Zelle (mit Erreichbarkeitswert)

⊙ Zentroid 500-Meter-Zelle (mit Erreichbarkeitswert)

Quelle: eigene Darstellung

Gleichung 9

$$\text{MRE}_{\text{RE}_i}^E = \frac{\sum_{k=1}^n I_k^E}{n} \text{ für } \{k | \subseteq \text{RE}_i\}$$

$\text{MRE}_{\text{RE}_i}^E$ = MRE im Erreichbarkeitsindikator E in Raumeinheit i

I_k^E = Erreichbarkeitswert im Indikator E in Rasterzelle k
(bewohnte 100-Meter-Zelle)

5.1.3 Vorstellung der eingesetzten Messverfahren

In den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 wurden mit dem VarK und der MRE die zur Bestimmung von Aggregationsfehlern wesentlichen Kenngrößen eingeführt. Die abgeleiteten Messverfahren umfassen *einfache VarK* (eVarK), *relationale VarK* (RelVarK) und *einwohnergewichtete VarK* (eVarKew, RelVarKew). Alle Raumeinheiten der Vergleichssysteme bekommen jeweils einen VarK zugewiesen. Anschließend erfolgen eine einfache und eine einwohnergewichtete Berechnung von Mittelwerten über alle Raumeinheiten in der MRH (Abschnitt 5.1.4).

Einfache Variationskoeffizienten (eVarK)

Gleichung 10 zeigt die Berechnung des eVarK für den Erreichbarkeitsindikator E in bewohnten 100-Meter-Rasterzellen k innerhalb einer Raumeinheit i. Der eVarK bemisst sich also über die gewichtete mittlere Abweichung der einzelnen Erreichbarkeitswerte von der MRE (vgl. Gleichung 9). Liegen die einzelnen Erreichbarkeitswerte eng beieinander, ist der eVarK gering und der Nutzen einer hohen Auflösung begrenzt. Eine große Streuung von Einzelwerten deutet hingegen auf relevante Aggregationsfehler hin.

Ein eVarK > 1 bedeutet, dass die mittlere gewichtete Abweichung den Mittelwert übersteigt und die Einzelwerte erheblich streuen. Bei einem eVarK = 0,8 beträgt die Standardabweichung 80% vom Mittelwert. Die Erreichbarkeitswerte weichen im gewichteten Mittel also um 80% von ihrem Durchschnitt ab. Beträgt der eVarK = 0,1 bei einer mittleren

Reisezeit von 10 Minuten, weichen die Einzelwerte im gewichteten Mittel bereits um eine Minute von diesem Durchschnitt ab. Bei einer mittleren Reisezeit von einer Stunde ergäbe sich eine Abweichung von sechs Minuten. Ein allgemeiner Grenzwert kann nur in Abhängigkeit vom Untersuchungsgegenstand formuliert werden. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, sind in den nachfolgenden Auswertungen alle $\text{VarK} > 0,1$ besonders gekennzeichnet.

Gleichung 10

$$\text{eVarK}_{\text{RE}_i}^E = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k^E - \text{MRE}_{\text{RE}_i}^E)^2}{n}} \quad \text{für } \{k | \sqsubseteq \text{RE}_i\}$$

$\text{eVarK}_{\text{RE}_i}^E$ = einfacher VarK im Erreichbarkeitsindikator E in Raumeinheit i

$\text{MRE}_{\text{RE}_i}^E$ = MRE im Erreichbarkeitsindikator E in Raumeinheit i

I_k^E = Erreichbarkeitswert im Indikator E in Rasterzelle k (bewohnte 100-Meter-Zelle)

Relationale Variationskoeffizienten (RelVarK)

In Abbildung 38 ist eine beispielhafte Verteilung von Erreichbarkeitswerten im bewohnten 100-Meter-Raster dargestellt. In diesem Fall liegt die MRE im Referenzsystem bei fünf. Aufgrund der geringen Streuung beträgt die Standardabweichung etwa 28% vom Mittelwert ($\text{eVarK} = 0,28$). Es ist also im Idealfall möglich, dass ein im 500-Meter-Raster (Vergleichssystem) berechneter Erreichbarkeitswert im Mittel um rund 28% von den tatsächlichen Erreichbarkeitsverhältnissen abweicht. Gleichwohl ist hier von einer idealisierten und in der Realität zumeist nicht auftretenden Konstellation auszugehen. Gleichzeitig soll eine geringe räumliche Auflösung die Erreichbarkeitsberechnung vereinfachen. Die Möglichkeit der späteren Aggregation von auf kleinräumiger Ebene berechneten Erreichbarkeitswerten scheidet daher aus (Stepniak & Rosik 2015, S. 232).

Wenn die Erreichbarkeit für ein geringer aufgelöstes Vergleichssystem über geometrische oder gewichtete Zentroide berechnet wird, ergeben sich jedoch die fiktiven Erreichbarkeitswerte zehn für geometrische und sechs für einwohnergewichtete Zentroide (vgl. Abbildung 38). Dies würde bedeuten, dass die Erreichbarkeitswerte im Referenzsystem zwar eine geringe Streuung aufweisen, die Berechnung der Erreichbarkeit im Vergleichssystem aber dennoch zu einem völlig anderen Erreichbarkeitswert führt. Es ist also die Streuung der Erreichbarkeitswerte im Referenzsystem gegenüber dem Erreichbarkeitswert im Vergleichssystem zu ermitteln. Anschließend wird diese zur MRE ins Verhältnis gesetzt. Der *relationale Variationskoeffizient* (RelVarK) bemisst sich also über die Standardabweichung von Erreichbarkeitswerten im Referenzsystem gegenüber dem Erreichbarkeitswert im Vergleichssystem. Die Standardabweichung wird anschließend zur MRE ins Verhältnis gesetzt (vgl. Gleichung 11).

Gleichung 11

$$\text{RelVarK}_{\text{RE}_i}^E = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\mathbf{I}_k^E - \mathbf{V}_{\text{RE}_i}^E)^2}{n}}{\text{MRE}_{\text{RE}_i}^E} \quad \text{für } \{k | \subseteq \text{RE}_i\}$$

$\text{RelVarK}_{\text{RE}_i}^E$ = relationaler VarK im Erreichbarkeitsindikator E
in Raumeinheit i

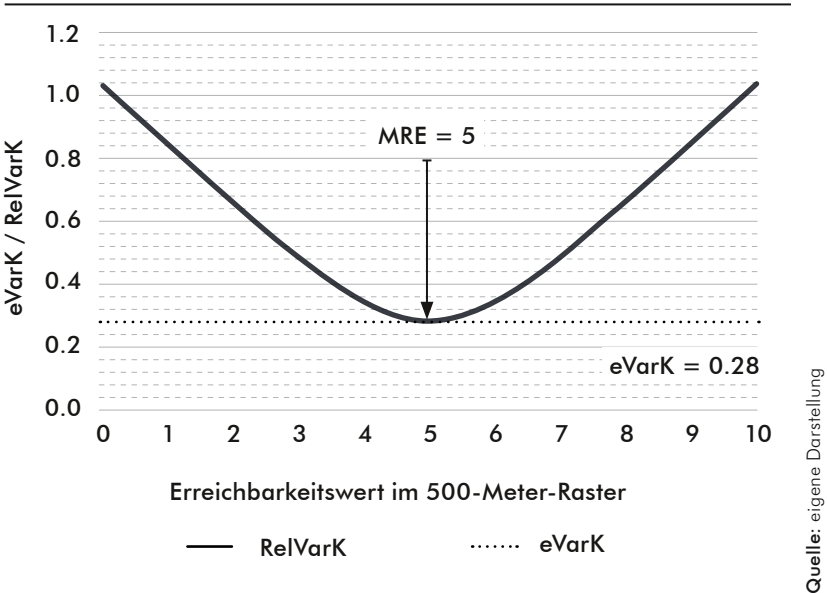
\mathbf{I}_k^E = Erreichbarkeitswert im Indikator E in Rasterzelle k
(bewohnte 100-Meter-Zelle)

$\mathbf{V}_{\text{RE}_i}^E$ = Erreichbarkeitswert im Indikator E in Vergleichseinheit i

$\text{MRE}_{\text{RE}_i}^E$ = MRE im Indikator E in Raumeinheit i

Abbildung 39: Variationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Erreichbarkeit im 500-Meter-Raster

Der eVarK bezieht sich auf die Aggregation von Erreichbarkeitswerten im 100-Meter-Raster. Diese wird nicht vom im 500-Meter-Raster berechneten Erreichbarkeitswert beeinflusst.



In Abbildung 39 ist dargestellt, wie sich der RelVarK im Vergleich zum eVarK in Abhängigkeit von einem im 500-Meter-Raster berechneten Erreichbarkeitswert verändert. Dieser Berechnung liegt die in Abbildung 38 dargestellte Verteilung von Erreichbarkeitswerten zugrunde. Die im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Erreichbarkeitswerte werden bei einer Aggregation in ihren gemeinsamen Mittelwert überführt. Dieser Mittelwert beträgt fünf und würde im gewichteten Mittel um 28,0% von den Erreichbarkeitswerten auf Ebene des bewohnten 100-Meter-Rasters abweichen. Werden die Erreichbarkeitswerte nicht aggregiert, sondern ein einzelner Wert im 500-Meter-Raster berechnet, würde sich eine minimale mittlere Abweichung von den im 100-Meter-Raster berechneten Erreichbarkeitswerten ergeben, wenn für den Zentroiden im 500-Meter-Raster ebenfalls ein Erreichbarkeitswert von

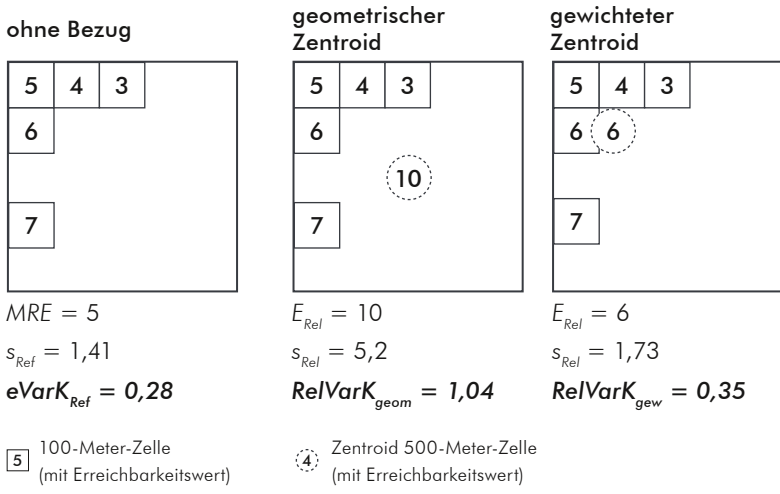
Quelle: eigene Darstellung

fünf berechnet werden würde (vgl. Abbildung 39). Der RelVarK wird also minimal, wenn der im 500-Meter-Raster berechnete Erreichbarkeitswert der MRE entspricht. Weicht dieser Wert jedoch von der MRE ab, ergibt sich ein deutlich höherer RelVarK. Die Aggregation der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Erreichbarkeitswerte in ein 500-Meter-Raster ist folglich mindestens so genau, wie die Berechnung der Erreichbarkeitswerte im 500-Meter-Raster.

Für die in Abbildung 38 dargestellte Streuung zwischen Einzelwerten im 100-Meter-Raster ist also darstellbar, ob ein im 500-Meter-Raster ermittelter Erreichbarkeitswert diese Verteilung hinreichend gut repräsentiert. Wie sich in Abbildung 40 zeigt, repräsentiert der für einen einwohnergewichteten Zentroiden ermittelte Vergleichswert ($\text{RelVarK} = 0,35$) die Referenzverteilung wesentlich besser, als die Berechnung für einen geometrischen Zentroiden ($\text{RelVarK} = 1,04$). Da der RelVarK jedoch nicht unter dem eVarK liegen kann ist es ebenfalls nicht möglich, eine starke Streuung von Erreichbarkeitswerten im Referenzsystem über einen zufällig der MRE entsprechenden Vergleichswert repräsentativ abzubilden.

Abbildung 40: Unterschiedliche Repräsentationsebenen und VarK

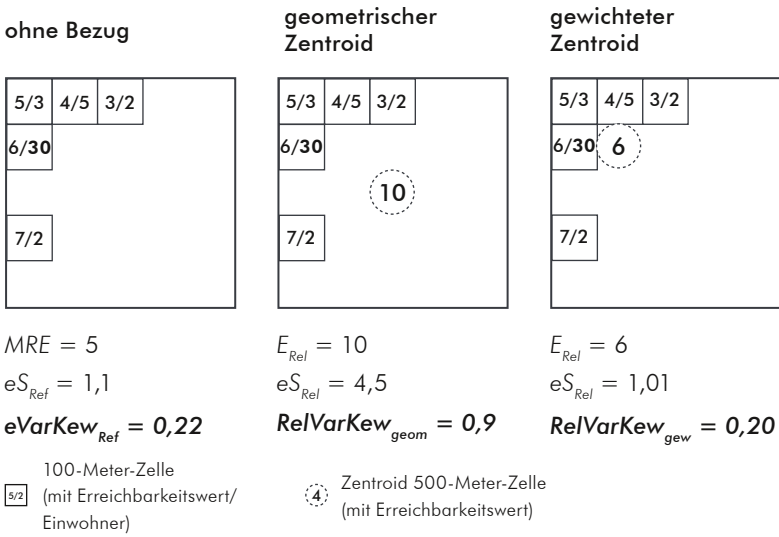
Dargestellt ist eine exemplarische Verteilung von Erreichbarkeitswerten.



Quelle: eigene Darstellung

Einwohnergewichtete Variationskoeffizienten (eVarKew/ RelVarKew)
 Sowohl der einfache als auch der relationale VarK basieren auf ungewichteten Unterschieden zwischen Erreichbarkeitswerten im Referenz- und im Vergleichssystem. Die Ergebnisse werden also nicht durch die Einwohnerzahl in den jeweiligen 100-Meter-Zellen beeinflusst. Dies bedeutet aber auch, dass die Repräsentativität von Erreichbarkeitswerten im Vergleichssystem gegenüber bewohnten Gebieten und nicht gegenüber den Einwohnern ermittelt wird. In der Regel wird räumliche Planung jedoch für die Wohnbevölkerung durchgeführt. Außerdem dienen die verwendeten standortbasierten Erreichbarkeitsindikatoren insbesondere zur Messung der wohnstandortbezogenen Mobilitäts- optionen. Um die Repräsentativität von Erreichbarkeitswerten gegenüber der Wohnbevölkerung zu überprüfen, ist eine Gewichtung von Erreichbarkeitsunterschieden über die Einwohnerzahl unabdingbar. Gerade in Gemeinden und statistischen Gebieten liegen zahlreiche bewohnte 100-Meter-Zellen mit einer großen Variation der Einwohnerzahl

Abbildung 41: Einfluss der Einwohnergewichtung auf die einzelnen VarK
 Dargestellt ist eine exemplarische Verteilung von Erreichbarkeitswerten und Einwohnern.



Quelle: eigene Darstellung

(vgl. Karte 5). Ferner kann die Bedeutung einwohnergewichteter Zentroide nicht korrekt eingeschätzt werden, wenn die Gewichtung der VarK über die Einwohner unterbleibt.

Einwohnergewichtete Zentroide werden verwendet, um eine größere Repräsentativität aggregierter Raumeinheiten gegenüber den tatsächlichen Wohnstandorten der Bevölkerung zu erzielen. Es ist davon auszugehen, dass die über einen einwohnergewichteten Zentroiden ermittelten Vergleichswerte eine geringere Abweichung von den Referenzwerten aufweisen, wenn die Abweichungen um die betroffenen Einwohner gewichtet werden. Abbildung 41 zeigt die um fiktive Einwohnerzahlen ergänzte Verteilung von Erreichbarkeitswerten in einem Referenzsystem (vgl. Abbildung 40). Anschließend wird mit der MRE und der einwohnergewichteten Standardabweichung der einwohnergewichtete eVarK ermittelt (vgl. Gleichung 12). Die Abweichungen der Referenzwerte gegenüber dem Mittelwert werden mit der Einwohnerzahl je bewohnter 100-Meter-Zelle multipliziert, um eine um die Einwohnerzahl gewichtete Standardabweichung zu berechnen. Diese Standardabweichung wird anschließend zur MRE ins Verhältnis gesetzt. Unter Annahme der in Abbildung 41 dargestellten Bevölkerungsverteilung reduziert sich der eVarK von 0,28 auf 0,22.

Gleichung 12

$$\mathbf{eVarKew}_{RE_i}^E = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k^E - MRE_{RE_i}^E)^2 * EW_k}{\sum_{k=1}^n EW_k}} \quad \text{für } \{k | \subseteq RE_i\}$$

$\mathbf{eVarKew}_{RE_i}^E$ = einwohnergewichteter RelVarK im Erreichbarkeitsindikator E in Raumeinheit i

I_k^E = Erreichbarkeitswert im Indikator E in Rasterzelle k (bewohnte 100-Meter-Zelle)

EW_k = Einwohner in Rasterzelle k (bewohnte 100-Meter-Zelle)

$MRE_{RE_i}^E$ = MRE im Indikator E in Raumeinheit i

Abschließend erfolgt die Berechnung des einwohnergewichteten RelVarK (RelVarKew). Wie bereits bei der Berechnung des RelVarK, wird auch hier die Standardabweichung zwischen den Referenzwerten und dem Vergleichswert ermittelt. Zusätzlich erfolgt eine Gewichtung um die Einwohnerzahl. Abschließend wird die einwohnergewichtete Standardabweichung zur MRE ins Verhältnis gesetzt (vgl. Gleichung 13). Daraus ergeben sich die in Abbildung 41 dargestellten RelVarKew für die Vergleichswerte auf Basis eines geometrischen und eines einwohnergewichteten Zentroiden. Zwar reduzieren sich die RelVarKew in beiden Fällen, der gewichtete Zentroid repräsentiert die Verteilung der Referenzwerte jedoch wesentlich zuverlässiger. Der RelVarKew liegt sogar unterhalb des eVarKew, da der für den gewichteten Zentroiden ermittelte Erreichbarkeitswert im Vergleich zur ungewichteten MRE näher am Einwohnerschwerpunkt liegt.

Gleichung 13

$$\text{RelVarKew}_{\text{RE}_i}^E = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k^E - V_{\text{RE}_i}^E)^2 * \text{EW}_k}{\sum_{k=1}^n \text{EW}_k}} \quad \text{für } \{k | \subseteq \text{RE}_i\}$$

$\text{RelVarKew}_{\text{RE}_i}^E$ = einwohnergewichteter RelVarK im Erreichbarkeitsindikator E in Raumeinheit i

I_k^E = Erreichbarkeitswert im Indikator E in Rasterzelle k
(bewohnte 100-Meter-Zelle)

$V_{\text{RE}_i}^E$ = Erreichbarkeitswert im Indikator E in Vergleichseinheit i

EW_k = Einwohner in Rasterzelle k (bewohnte 100-Meter-Zelle)

$\text{MRE}_{\text{RE}_i}^E$ = MRE im Indikator E in Raumeinheit i

Der eVarK zeigt, wie gut ein berechneter Vergleichswert die Erreichbarkeitsverhältnisse innerhalb einer Raumeinheit theoretisch repräsentieren könnte. Der RelVarK ermöglicht eine Aussage darüber, ob die mögliche Repräsentativität tatsächlich erreicht wird. Eine große Diskrepanz zwischen eVarK, eVarKew und RelVarKew macht eine disperse Bevölkerungsverteilung innerhalb der Raumeinheit und eine

generell geringe Repräsentativität der Erreichbarkeitswerte in Relation zur Bevölkerung wahrscheinlich.

5.1.4 Analysen mit dem Erreichbarkeitsmodell der MRH

Der Einsatz dieser Messverfahren erfolgt mit Hilfe eigener Skripte in der Programmiersprache Python und den Modulen NumPy und Pandas. Die Aggregationsfehler auf Ebene der Raumeinheiten in den Vergleichssystemen werden für die gesamte MRH zusammengefasst. Entweder über die Bildung einfacher (vgl. Gleichung 14) oder einwohnergewichteter (vgl. Gleichung 15) durchschnittlicher VarK. Auch hier ist es also möglich, die Repräsentativität von Erreichbarkeitswerten gegenüber den bewohnten Flächen oder in Relation zur Bevölkerungsverteilung zu beurteilen.

Gleichung 14

$$eVarK_{RB_v}^E = \frac{\sum_{i=1}^n eVarK_{RE_i}^E}{n} \text{ für } \{i \subseteq RB_v\}$$

$eVarK_{RB_v}^E$ = mittlerer $eVarK$ im Erreichbarkeitsindikator E im Raumbezugssystem v

$eVarK_{RE_i}^E$ = $eVarK$ im Erreichbarkeitsindikator E in Raumeinheit i

Gleichung 15

$$EWVarK_{RB_v}^E = \frac{\sum_{i=1}^n (VarK_{RE_i}^E \times EW_{RE_i})}{\sum_{i=1}^n EW_{RE_i}} \text{ für } \{i \subseteq RB_v\}$$

$EWVarK_{RB_v}^E$ = mittlerer einwohnergewichteter $eVarK$ im Erreichbarkeitsindikator E im Raumbezugssystem i

$eVarK_{RE_i}^E$ = $eVarK$ im Erreichbarkeitsindikator E in Raumeinheit i

EW_{RE_i} = Einwohner in Raumeinheit i

Allen Berechnungen liegen die folgenden Annahmen zugrunde:

a) *Es werden nur bewohnte Raumeinheiten berücksichtigt.*

Da lediglich bewohnte 100-Meter-Zellen im Referenzsystem berücksichtigt werden, können für die unbewohnten Raumeinheiten in den Vergleichssystemen keine VarK bestimmt werden. Beispielsweise beinhalten 35,13% bzw. 40.720 aller 500-Meter-Zellen zumindest eine bewohnte 100-Meter-Zelle. Dies bedeutet auch, dass die für unbewohnte Raumeinheiten berechneten Erreichbarkeitswerte die Ergebnisse nicht beeinflussen.

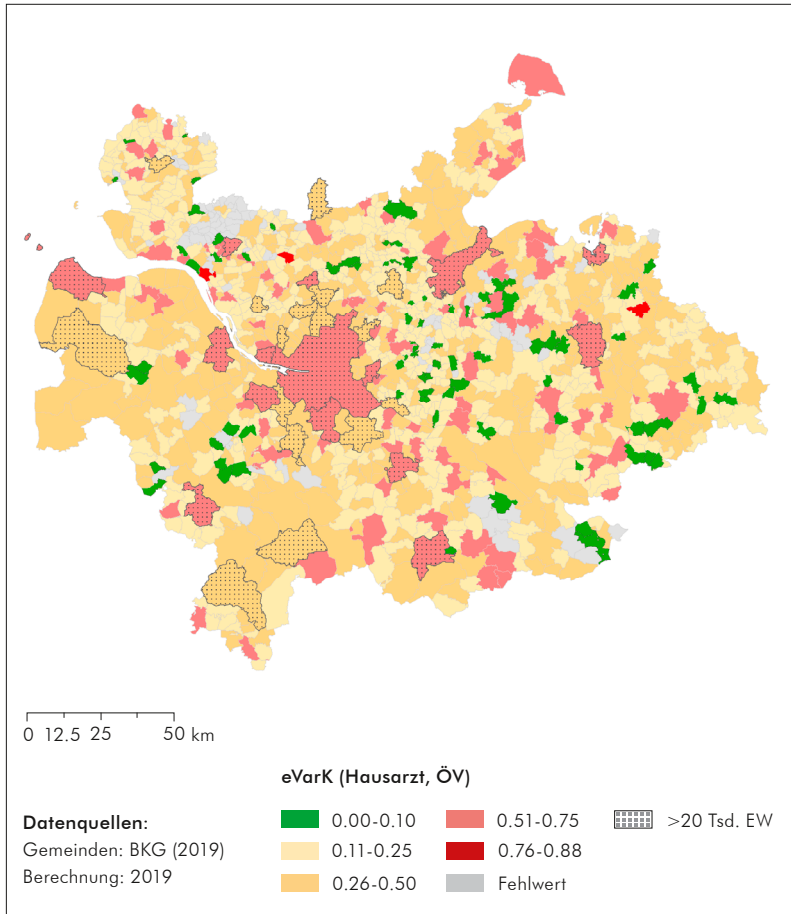
b) *Es werden bei der Berechnung der Aggregationsfehler nur Raumeinheiten mit gültigen Erreichbarkeitswerten berücksichtigt.*

Gerade im ÖV und im Fußverkehr existieren aufgrund der restriktiven Modellannahmen zahlreiche bewohnte 100-Meter-Zellen ohne gültigen Erreichbarkeitswert (vgl. Abschnitte 3.5.1 und 3.5.3). Dies ist unter anderem der Fall, wenn keine Gelegenheit innerhalb einer maximalen Fahrtzeit von zwei Stunden erreicht wird. Im Gelegenheitstyp Supermarkt wird aus 12,41% aller bewohnten 100-Meter-Zellen im ÖV und aus 31,22% der bewohnten 100-Meter-Zellen im Fußverkehr kein Supermarkt erreicht. Gleichzeitig liegen im ÖV 1,25% der bewohnten 100-Meter-Zellen mit einem gültigen Erreichbarkeitswert innerhalb einer 500-Meter-Zelle ohne einen gültigen Wert. Daher erfolgt die Bildung von Mittelwerten im Gebiet der MRH nur für Raumeinheiten, die im Vergleichs- sowie im Referenzsystem gültige Erreichbarkeitswerte aufweisen. Außerdem bewirkt die Minderung gültiger Erreichbarkeitswerte in den Vergleichssystemen eine ungenaue Berechnung der RelVarK. Weisen von fünf 100-Meter-Zellen innerhalb einer 500-Meter-Zelle nur zwei einen Erreichbarkeitswert auf, reduziert dies den berechneten Aggregationsfehler innerhalb dieser 500-Meter-Zelle. Und dies, obwohl große Unterschiede in den Erreichbarkeitsverhältnissen bestehen. Gleichwohl handelt es sich hier um eine vernachlässigbare Sonderkonstellation.

Karte 16 zeigt den eVarK im Gelegenheitstyp Hausarzt und für den ÖV auf Ebene der 1.123 Gemeinden in der MRH. Nur in 82 Gemeinden mit knapp 37 Tsd. Einwohnern liegt dieser bei maximal 0,1. Die Darstellung macht deutlich, dass die Reisezeiten zum nächsten Hausarzt in den bewohnten 100-Meter-Zellen zumeist um 11% bis 50% von der

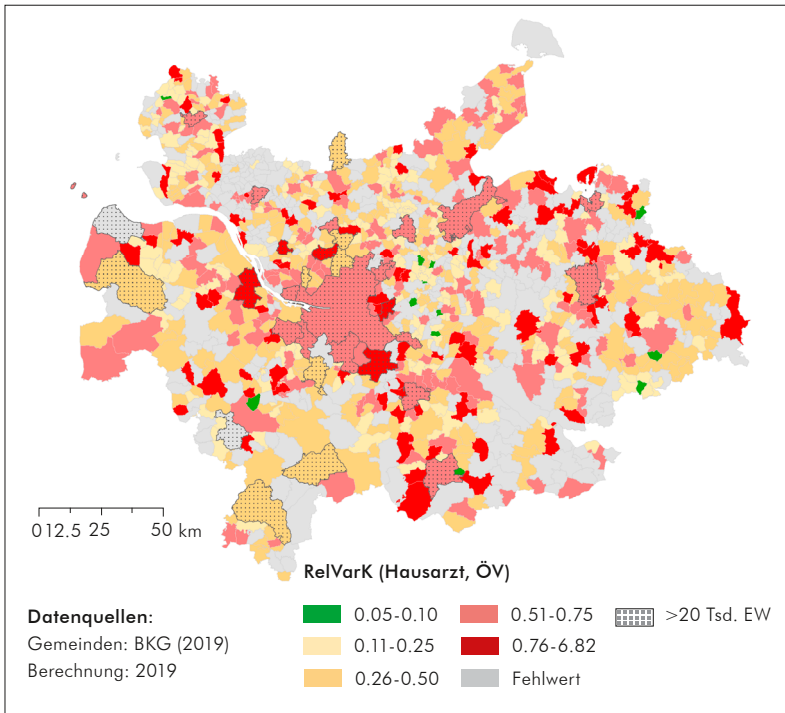
MRE abweichen. Der mittlere eVarK in der MRH liegt in diesem Beispiel bei 0,285. Deutlich zu erkennen ist auch, dass Gemeinden mit mehr als 20 Tsd. Einwohnern relativ höhere eVarK aufweisen. Entsprechend liegt der mittlere EWeVarK in der MRH bei 0,466. Bei der Berechnung von Erreichbarkeitswerten auf Gemeindeebene ist es also maximal möglich, die in Karte 16 dargestellte mittlere Abweichung von den tatsächlichen Erreichbarkeitsverhältnissen zu erzielen.

Karte 16: eVarK des ÖV und im Gelegenheitstyp Hausarzt



Die Berechnung der RelVarK zeigt jedoch deutlich, dass die auf Basis von geometrischen Zentroiden berechneten Erreichbarkeitswerte von der MRE deutlich abweichen. So beträgt der mittlere RelVarK 0,46 und der EWRelVarK 0,597. In nur 12 von 1.123 Gemeinden mit insgesamt 4 Tsd. Einwohnern liegt der RelVarK in diesem Beispiel bei maximal 0,1. In 36 Gemeinden mit rund 146 Tsd. Einwohnern hingegen bei über 1,0. Dies bedeutet auch, dass die in diesen Gemeinden berechneten Reisezeiten im gewichteten Mittel um mehr als 100% von der MRE abweichen. In weiteren 329 Gemeinden mit 48 Tsd. Einwohnern konnte aufgrund der fehlenden Haltestellenanbindung der geometrischen Gemeindegewichte kein RelVarK ermittelt werden. In den übrigen 746 Gemeinden liegt der RelVarK zwischen 0,1 und 1,0.

Karte 17: RelVarK des ÖV für geometrische Zentroide im Gelegenheitstyp Hausarzt



In Abschnitt 5.1.3 wurden vier Messwerte vorgestellt, um Aggregationsfehler bei der Erreichbarkeitsberechnung zu quantifizieren. Dies sind der eVarK, der einwohnergewichtete eVarK (eVarKew), der relationale VarK (RelVarK) sowie der einwohnergewichtete RelVarK (RelVarKew). Die Aggregationsfehler werden für alle Raumeinheiten in den fünf Vergleichssystemen ermittelt. Anschließend erfolgt die einfache und einwohnergewichtete Durchschnittsbildung über alle Raumeinheiten in den Vergleichssystemen in der MRH. Daraus ergeben sich insgesamt acht Messverfahren. In Tabelle 34 sind die mittleren Messwerte für die 20 berücksichtigten Gelegenheitstypen und für eine besonders hohe (500-Meter-Raster) und eine besonders niedrige Auflösung (Gemeinden) aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Streuung der Einwohnerzahl innerhalb von Gemeinden den eVarK nahezu nicht beeinflusst (eVarK vs. eVarKew). Gleichzeitig steigt der eVarK in beiden Verkehrsmodi deutlich an, wenn die Einwohnerunterschiede zwischen den Gemeinden berücksichtigt werden (EWeVarK, EWRelVarK etc.). Die berechneten Erreichbarkeitswerte besitzen innerhalb von Gemeinden sowohl gegenüber den Siedlungsflächen als auch den Einwohnern eine ähnliche Repräsentativität.

Tabelle 34: Mittlere VarK in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus und dem Vergleichssystem

Die aufgeführten VarK wurden über alle Gelegenheitstypen gemittelt.

Messwerte	500-Meter-Raster				Gemeinden			
	MIV	ÖV	Fuß	Rad	MIV	ÖV	Fuß	Rad
eVarK	0,020	0,063	0,092	0,044	0,117	0,165	0,266	0,217
eVarKew	0,020	0,061	0,089	0,042	0,110	0,157	0,253	0,202
EWeVarK	0,051	0,136	0,179	0,136	0,249	0,362	0,511	0,564
EWeVarKew	0,049	0,130	0,172	0,130	0,233	0,333	0,470	0,483
RelVarK	0,035	0,114	0,146	0,075	0,149	0,312	0,823	0,288
RelVarKew	0,034	0,113	0,145	0,075	0,140	0,309	0,814	0,269
EWRelVarK	0,062	0,170	0,215	0,167	0,338	0,473	0,834	0,719
EWRelVarKew	0,061	0,167	0,210	0,162	0,311	0,408	0,774	0,569

Quelle: eigene Darstellung

Für den Vergleich zwischen den Gemeinden gilt jedoch, dass die Erreichbarkeitswerte in einwohnerstarken Gemeinden eine geringere Verallgemeinerbarkeit aufweisen, als in Gemeinden mit einer niedrigeren Einwohnerzahl (vgl. Abbildung 45). Bei der Aggregation der im bewohnten 100-Meter-Raster ermittelten Erreichbarkeitswerte ist eine zusätzliche Gewichtung um die Einwohnerzahl also nicht erforderlich. Gleichwohl zeigt sich, dass die Aggregation in Gebieten mit einer großen Einwohnerzahl zu höheren Ungenauigkeiten führt. Wenn es um die bloße kartographische Darstellung geht, können diese noch vernachlässigt werden. Sind jedoch Erreichbarkeitswerte oder Erreichbarkeitsdiagramme mit einem Einwohnerbezug zu erstellen, sind hohe Aggregationsfehler nicht zu vermeiden. Aufgrund der geringen zusätzlichen Aussagekraft von eVarKew und RelVarKew werden diese in den anschließenden Auswertungen nicht berücksichtigt (vgl. Tabelle 34).

5.2 Vektor- und Rastermodelle

Im folgenden Abschnitt wird unter anderem beantwortet, wie sich die räumliche Auflösung auf die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen auswirkt. Die Differenzierung erfolgt über die Verkehrsmodi sowie geometrische und gewichtete Zentroide. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse dem aktuellen Stand der Forschung gegenübergestellt und Hinweise für den Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen gegeben.

5.2.1 Aggregationsfehler und die räumliche Auflösung

Die Berechnung der Aggregationsfehler wird für Reiseaufwands-, Kumulations- und Potenzialindikatoren durchgeführt. Aufgrund der großen Bedeutung in der Planungspraxis beschränken sich die ersten Analysen auf den Reiseaufwand zu nächsten Gelegenheiten (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Eine differenzierte Darstellung für die Erreichbarkeitsindikatoren und Gelegenheitstypen erfolgt in Abschnitt 5.4. Insgesamt wurde für 24 Gelegenheitstypen der minimale Reiseaufwand zur nächsten Einrichtung ermittelt (vgl. Abschnitt 3.6).

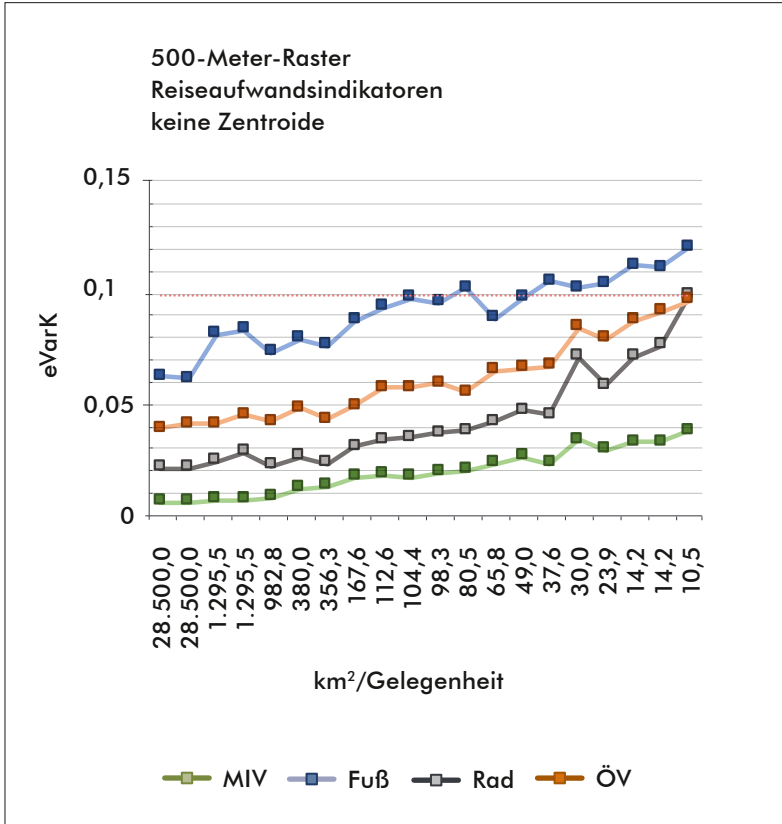
eVarK in Abhängigkeit vom Raumbezug

Abbildung 42 zeigt den mittleren eVarK der Reiseaufwandsindikatoren im 500-Meter-Raster und für alle Gelegenheitstypen. Da die Stärke der Aggregationsfehler ganz entscheidend von der Dichte der Einrichtungen in den Gelegenheitstypen abhängt, wird diese als Bezugsgröße auf der x-Achse abgetragen (vgl. Abschnitt 5.4). Die Zuordnung der Einrichtungsdichten zu den Gelegenheitstypen ist Tabelle 47 zu entnehmen. Neben der Einrichtungsdichte beeinflusst auch der Verkehrsmodus die Stärke von Aggregationsfehlern. So weichen die Erreichbarkeitswerte im MIV auch unter Berücksichtigung einer hohen Einrichtungsdichte⁶⁷ nur um maximal 3,9% von der MRE ab. Der MIV profitiert also weniger stark von einer hohen räumlichen Auflösung, da die Erreichbarkeitsunterschiede im Referenzsystem relativ gering sind.

67 Supermärkte (14,2 km²/Gelegenheit), Hausärzte (14,2 km²/Gelegenheit) und Kitas (10,5 km²/Gelegenheit)

Abbildung 42: eVarK im 500-Meter-Raster nach Verkehrsmodi und Dichte der Gelegenheiten

Dargestellt ist der eVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus und der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen. Der Linienverlauf zeigt die durchschnittliche gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten im Verhältnis zu ihren Mittelwerten innerhalb der Zellen des 500-Meter-Rasters. Der eVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.



Im ÖV beträgt der eVarK im Gelegenheitstyp Hausarzt (14,2 km²/Gelegenheit) bereits 0,092 bzw. 9,2%. Das bedeutet, dass die Standardabweichung der Reisezeiten auf Ebene des 100-Meter-Rasters innerhalb einer 500-Meter-Zelle im Durchschnitt 9,2% von der MRE beträgt. Die MRE des Erreichbarkeitsindikators ›nächster Hausarzt im ÖV‹ auf Ebene des bewohnten 100-Meter-Rasters beträgt 24 Minuten und 35 Sekunden. Innerhalb der 500-Meter-Zellen weichen die Referenzwertewerte also im Mittel um rund 2,5 Minuten von dieser MRE ab. Wird die Erreichbarkeit von Hausärzten für ein 500-Meter-Raster berechnet, unterscheiden sich die Reisezeiten im Idealfall um durchschnittlich 9,2% von den Referenzwerten.

Gleichwohl ist es bei der Erreichbarkeitsberechnung in den Vergleichssystemen nur möglich, sich dem eVarK anzunähern. Da diese Erreichbarkeitswerte in der Regel nicht der MRE entsprechen, nehmen die Aggregationsfehler weiter zu. Abbildung 43 zeigt die im 500-Meter-Raster ermittelten RelVarK für die einzelnen Verkehrsmodi. Deutlich wird, dass sich die für geometrische Zentroide berechneten minimalen Reisezeiten von der MRE unterscheiden. Im Fußverkehr kann beispielsweise nur die Erreichbarkeit des Hamburger Hauptbahnhofs und des Flughafens mit einer sehr hohen Genauigkeit im 500-Meter-Raster berechnet werden. Auch im ÖV liegt nur bei Gelegenheitstypen mit mehr als 100 km² je Einrichtung⁶⁸ die mittlere Abweichung von der MRE unterhalb von 10,0%.

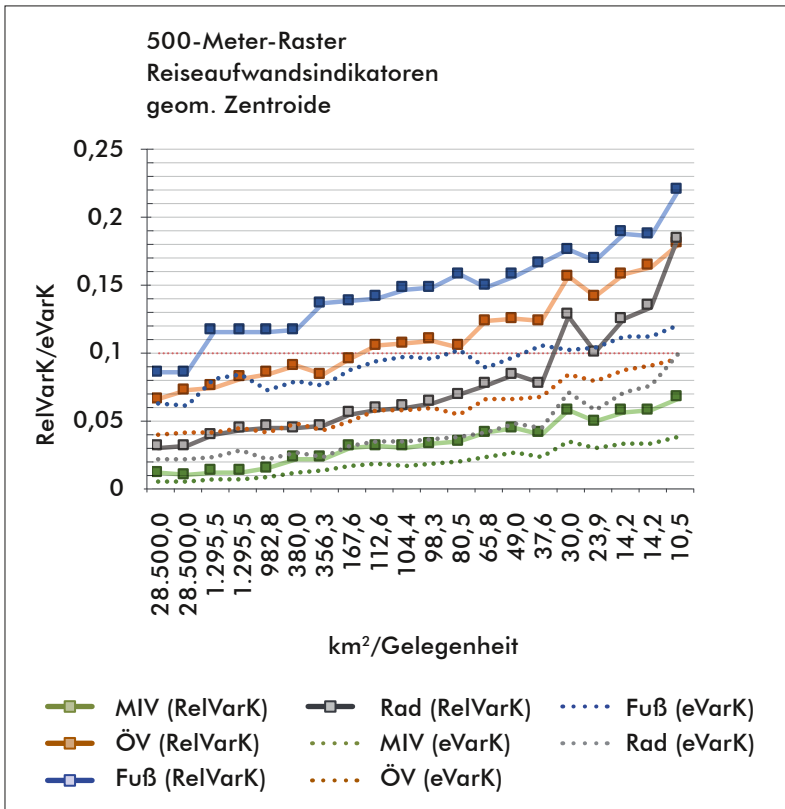
Es zeigt sich, dass die Aggregationsfehler mit der Einrichtungsdichte steigen und vom Verkehrsmodus abhängig sind. Abbildung 44 verdeutlicht am Beispiel des ÖV die Abnahme von Aggregationsfehlern bei einer Reduzierung der räumlichen Auflösung. In Rastermodellen mit einer Auflösung von einem Kilometer weichen die ÖV-Reisezeiten bei weniger als 20 km² je Gelegenheit im gewichteten Mittel um 26,7% bis 31,1% von der MRE ab. Im 500-Meter-Raster liegt dieser Werte zwischen 15,8% und 18,0%, im 5-Kilometer-Raster hingegen zwischen 54,7% und 63,5%. Der minimale Reiseaufwand kann für öffentliche Verkehrsmittel also nicht ohne erhebliche Aggregationsfehler berechnet werden, wenn

68 Unter anderem Oberzentren (1.295,5 km²/Gelegenheit), Fernbahnhöfe (982,8 km²/Gelegenheit), Mittelzentren (380,0 km²/Gelegenheit) und Augenärzte (112,6 km²/Gelegenheit)

die Auflösung unterhalb eines 500-Meter-Rasters liegt und mehr als eine Einrichtung auf 100km² entfällt. Gleichwohl ist es denkbar, den Reiseaufwand zu wenigen Zielen (zentrale Orte, Fernbahnhöfe, Flughäfen etc.) unter Verwendung einer geringen Auflösung mit einer hohen Genauigkeit zu berechnen.

Abbildung 43: RelVarK im 500-Meter-Raster nach Verkehrsmodi und Dichte der Gelegenheiten

Dargestellt ist der RelVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus und der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen. Der Linienvorlauf zeigt die mittlere gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten im Verhältnis zur berechneten Reisezeit im 500-Meter-Raster. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 44: RelVarK im 500-Meter-Raster nach Verkehrsmodi und Dichte der Gelegenheiten

Dargestellt ist der RelVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus und der Einrichtungsichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen. Der Linienverlauf zeigt die mittlere gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten im Verhältnis zur berechneten Reisezeit im 500-Meter-Raster. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.

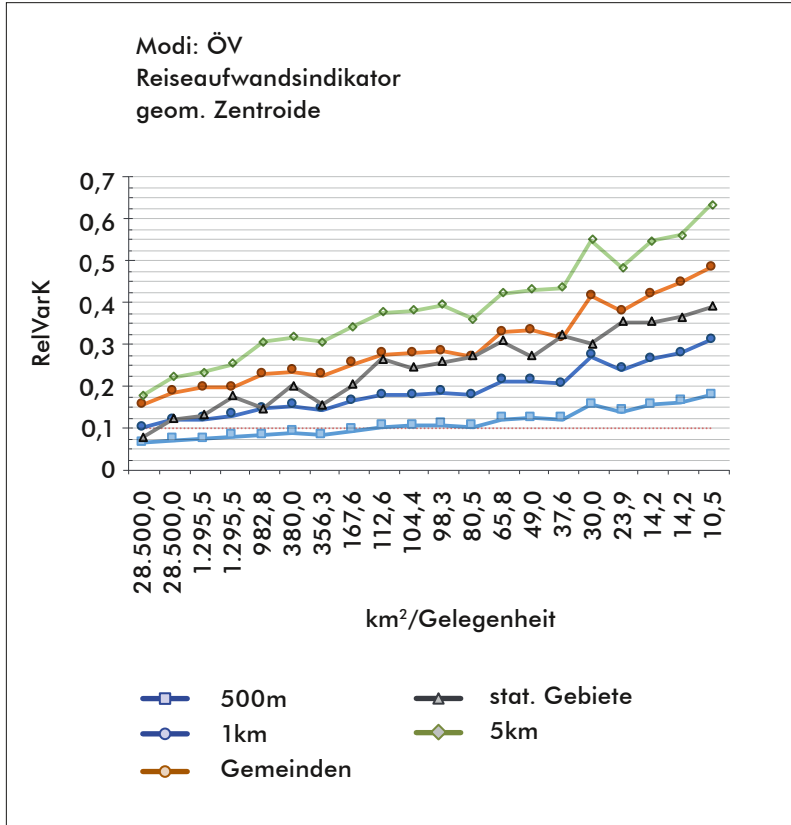


Tabelle 35: Mittlere VarK nach Verkehrsmodus und Vergleichssystem

Gleichgewichtung über alle Gelegenheitstypen. Die RelVarK wurden für geometrische Zentroide ermittelt. Der Einfluss einwohnergewichteter Zentroide wird in Abschnitt 5.2.2 diskutiert.

	Modus	eVarK	RelVarK	EWeVarK	EW RelVarK
500-Meter	MIV	0,020	0,035	0,051	0,062
	ÖV	0,063	0,114	0,136	0,170
	Fuß	0,092	0,146	0,179	0,215
	Rad	0,044	0,075	0,136	0,167
1-Kilometer	MIV	0,034	0,058	0,082	0,103
	ÖV	0,094	0,194	0,188	0,251
	Fuß	0,136	0,241	0,263	0,326
	Rad	0,067	0,122	0,199	0,252
5-Kilometer	MIV	0,144	0,196	0,195	0,243
	ÖV	0,206	0,426	0,314	0,470
	Fuß	0,312	0,928	0,475	0,756
	Rad	0,285	0,388	0,432	0,572
stat. Gebiete	MIV	0,088	0,114	0,092	0,115
	ÖV	0,185	0,247	0,192	0,241
	Fuß	0,225	0,305	0,241	0,292
	Rad	0,204	0,270	0,214	0,262
Gemeinden	MIV	0,117	0,149	0,249	0,338
	ÖV	0,165	0,312	0,362	0,473
	Fuß	0,266	0,823	0,511	0,834
	Rad	0,217	0,288	0,564	0,719

Quelle: eigene Darstellung

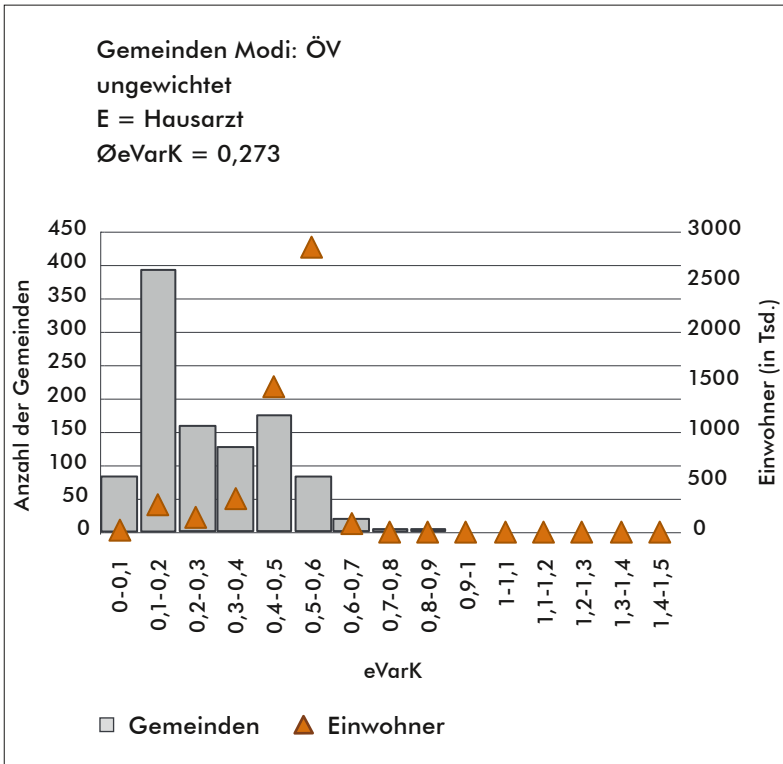
Eine Zusammenschau der berechneten VarK liefert Tabelle 35. Auffällig ist insbesondere, dass im MIV die mit Abstand geringsten Aggregationsfehler zu verzeichnen sind und zumindest im 500-Meter-Raster der Grenzwert von 0,1 in keinem Gelegenheitstyp überschritten wird. Demnach kann unter Beachtung aller Gelegenheitstypen im MIV auf eine relativ niedrige Auflösung zurückgegriffen werden (vgl. Abschnitt 5.4). Auch im 1-Kilometer-Raster liegt der mittlere eVarK, vom Fußverkehr abgesehen, immer unterhalb des Schwellenwertes. Gleichwohl nehmen die Aggregationsfehler unter Berücksichtigung der in den Vergleichssystemen berechneten Erreichbarkeitswerte deutlich zu (Rel-VarK). Lediglich im MIV liegen die Werte ohne Berücksichtigung der Einwohnerverteilung unter dem Grenzwert. In den Vergleichssystemen mit einer noch geringeren Auflösung liegen die Aggregationsfehler im Fuß- und Radverkehr mitunter deutlich über 50%. Gleichwohl ist zu betonen, dass auch ein VarK von 0,3 bedeutet, dass die berechneten Erreichbarkeitswerte im gewichteten Mittel bereits um 30% von der MRE abweichen. Bei einer Reisezeit von 10 Minuten entspricht dies immerhin drei Minuten. Die Verwendung geringer Auflösungen ist also zumindest im Langsamverkehr kritisch zu hinterfragen.

VarK und die Einwohnerverteilung

Auffällig ist, dass bei einer Gewichtung der Aggregationsfehler um die Einwohnerzahl in den Raumeinheiten der Vergleichssysteme ein deutlicher Anstieg der Aggregationsfehler zu beobachten ist (vgl. Tabelle 35 und Karte 17). Auf Ebene der Vektormodelle (Gemeinden und stat. Gebiete) resultiert dieser Effekt aus der hohen Bevölkerungszahl in größeren Gemeinden. Abbildung 45 zeigt für die schnellsten ÖV-Wegen zum nächsten Hausarzt, wie sich die eVarK auf die Gemeinden in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl verteilen. In der MRH liegen 1.036 Gemeinden mit gültigen Erreichbarkeitswerten, von denen der nächste Hausarzt innerhalb von maximal 60 Minuten mit öffentlichen Verkehrsmitteln zu erreichen ist. Weitere 87 Gemeinden weisen keine gültige Verbindung auf. In 393 Gemeinden liegt der eVarK zwischen 0,1 und 0,2, in 105 Gemeinden liegt der eVarK über 0,5. In den 255 Gemeinden mit einem eVarK zwischen 0,4 und 0,6 leben jedoch 83,1% der Einwohner. In diesem Wertebereich liegen mit Hamburg und Lübeck auch die

einwohnerreichsten Städte der MRH. Dies deutet darauf hin, dass die Erreichbarkeitsberechnung für große und bevölkerungsreiche Gemeinden eher von einer hohen Auflösung profitiert.

Abbildung 45: VarK nach Anzahl der Raumeinheiten und Einwohner
 Dargestellt ist der klassifizierte eVarK auf Gemeindeebene für die ÖV-Reisezeit zum nächsten Hausarzt in Abhängigkeit von der Anzahl der Gemeinden bzw. der Einwohnerzahl in diesen Gemeinden.

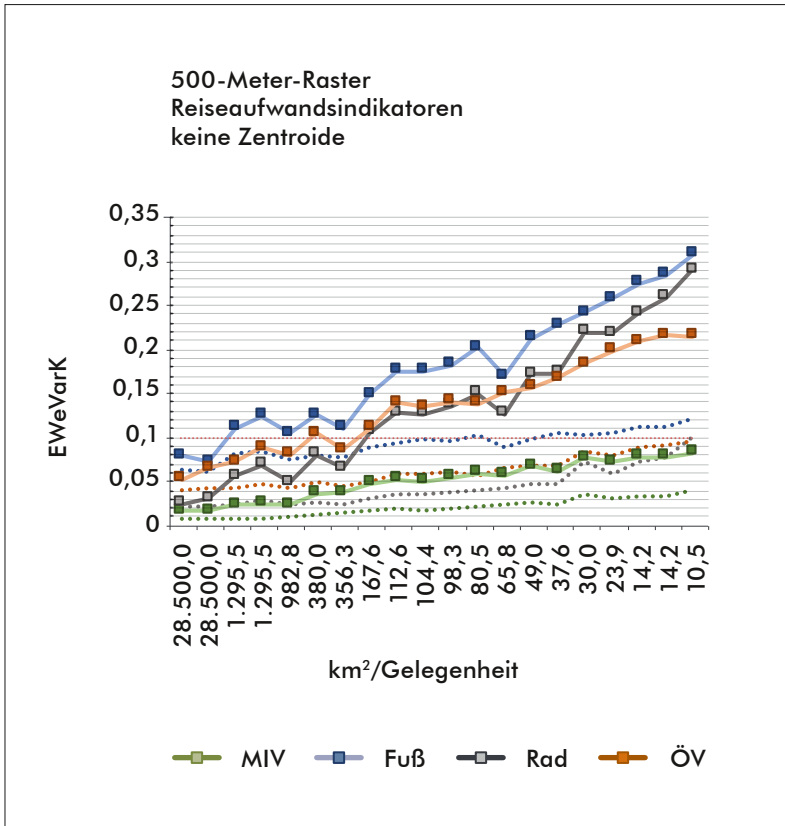


Da dieser Effekt auch in den regelmäßigen Rastermodellen zu beobachten ist, kann das Übergewicht der einwohnerstarken und flächen großen Städte nicht allein ausschlaggebend sein. So zeigt sich selbst im 500-Meter-Raster mit einer steigenden Bevölkerungszahl auch eine deutliche Zunahme der Aggregationsfehler (vgl. Abbildung 46). Es ist eine größere Zahl bewohnter 100-Meter-Zellen in einwohnerstarken Raumeinheiten zu vermuten. Gleichzeitig können Aggregationsfehler auch von der Menge der bewohnten Zellen im Referenzsystem abhängen. Beispielsweise liegt im Radverkehr der mittlere eVarK im Gelegenheits-typ *Hausarzt* und im 500-Meter-Raster bei 0,077. Dieser steigt bei einer Gewichtung um die Einwohnerzahl auf 0,259 (EWeVarK). Wird hingegen die Menge der bewohnten 100-Meter-Zellen in einer Raumeinheit als Gewichtungsfaktor herangezogen, steigt der eVarK auf 0,149. Dieser Umstand deutet daraufhin, dass die Menge der bewohnten 100-Meter-Zellen je Raumeinheiten einen erheblichen Einfluss auf die Stärke der Aggregationsfehler aufweist.

Im 500-Meter-Raster korreliert der eVarK mit der Anzahl der bewohnten Zellen je Raumeinheit über alle Verkehrsmodi und Gelegenheiten mit durchschnittlich 0,547. Die Korrelation hängt nicht vom Verkehrsmodus ab und steigt in einem geringen Umfang mit der Gelegenheitsdichte. Die Korrelation zwischen dem eVarK und der Einwohnerzahl beträgt 0,46. Hier zeigen die Analysen keinen besonderen Einfluss des Modus oder des Gelegenheitsstyps. In Gemeinden korrelieren VarK und die Menge der bewohnten Zellen mit 0,287 bzw. mit 0,186 für die Einwohnerzahl. Die Korrelationen sind in den Verkehrsmodi ähnlich, nehmen mit der Gelegenheitsdichte aber deutlich ab. Das deutliche Ungleichgewicht in der Bevölkerungsverteilung führt zu erheblichen Verzerrungen. Mit Hamburg beinhaltet bereits eine einzelne Gemeinde (von 1.123) etwa ein Drittel der Gesamtbevölkerung der MRH. In den regelmäßigen Rastermodellen ist hingegen ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Stärke von Aggregationsfehlern und der Menge der bewohnten 100-Meter-Zellen zu erkennen. Dieser Effekt entsteht durch die Zunahme der Einwohnerzahl und der räumlichen Streuung von Erreichbarkeitswerten mit einem Anstieg der bewohnten Flächen.

Abbildung 46: EWeVarK im 500-Meter-Raster nach Verkehrsmodi und Dichte der Gelegenheiten

Dargestellt ist der einwohnergewichtete eVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus und der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen. Der Linienvverlauf zeigt die um die Einwohnerzahl gewichtete durchschnittliche gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten im Verhältnis zu ihren Mittelwerten innerhalb der Zellen des 500-Meter-Rasters. Der einfache VarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert. Die gepunkteten Linien entsprechen dem Verlauf im VarK (vgl. Abbildung 42).



Wenn Erreichbarkeitswerte für hoch aggregierter Raumeinheiten zusammengefasst werden, ist die Repräsentativität dieser Werte gegenüber den bewohnten Flächen wesentlich größer, als gegenüber der Einwohnerzahl. Bei der Wahl des Raumbezugssystems muss also berücksichtigt werden, welche Art der Ergebnisdarstellung eine Erreichbarkeitsanalyse ermöglichen soll. Karten basieren zumeist auf einer räumlichen Verortung von Erreichbarkeitsniveaus, Erreichbarkeitsdiagramme hingegen auf Einwohnerrelationen. Wenn solche Einwohnerrelationen berechnet werden, ist eine tendenziell höhere räumliche Auflösung anzustreben.

5.2.2 Geometrische und einwohnergewichtete Zentroide

In der Verwendung einwohnergewichteter Zentroide wird eine Möglichkeit gesehen, um Aggregationsfehler unter Beachtung der Bevölkerungsverteilung zu reduzieren (Prinz & Herbst 2008, S. 8; Schwarze 2015, S. 118). Der gewichtete Zentroid einer Raumeinheit entspricht nicht dem geometrischen Mittelpunkt, sondern dem Einwohnerschwerpunkt (vgl. Abschnitt 3.4.1). Es ist davon auszugehen, dass die mit Hilfe der einwohnergewichteten Zentroide berechneten Erreichbarkeitswerte eine höhere Repräsentativität gegenüber den bewohnten Flächen und gegenüber der Bevölkerungszahl aufweisen.

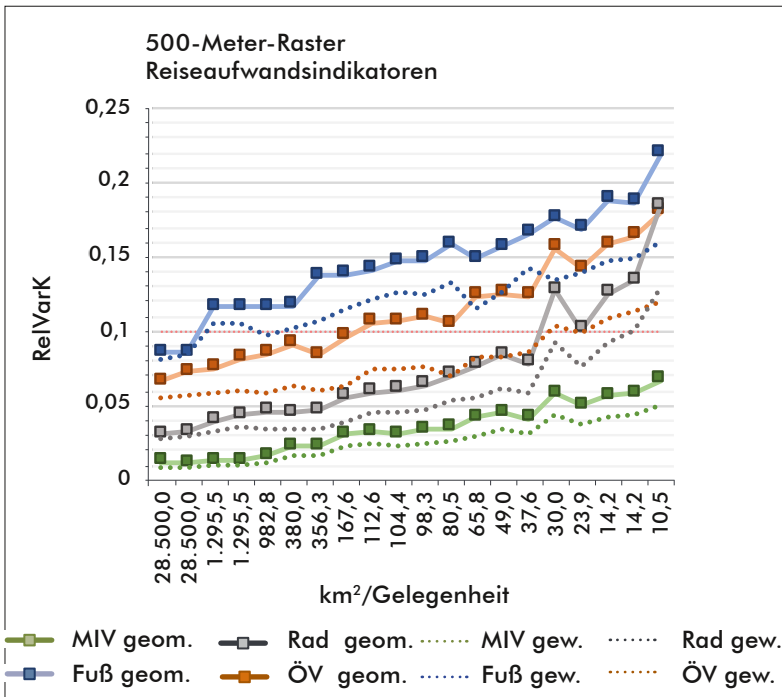
Stępnia & Jacobs-Crisioni (2017, S. 26) kommen zu dem Schluss, dass die Einwohnergewichtung dem geometrischen Verfahren immer vorzuziehen ist. In einer weiteren Untersuchung wird betont, dass eine über die Raumstruktur gewichtete Anbindung von Verkehrsbezirken in Verkehrsmodellen eine genauere Widerstandsberechnung ermöglicht (Manout et al. 2018, S. 97). Hewko et al. (2002, S. 1195) wenden jedoch ein, dass die Verwendung einwohnergewichteter Zentroide nur zu einer geringen Reduzierung von Aggregationsfehlern führt und insbesondere unrealistisch kurze Distanzen weiterhin bestehen bleiben (Fehler B; Eigenpotenzialproblem). Da die genannten Untersuchungen weder für multimodale Verkehrsgraphen noch hochaufgelöste Rastermodelle durchgeführt wurden, sind bisher keine differenzierten Aussagen hinsichtlich des Einflusses auf die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen möglich.

Aggregationsfehler und einwohnergewichtete Zentroide

In Abbildung 47 sind für das 500-Meter-Raster die RelVarK unter Berücksichtigung geometrischer und einwohnergewichteter Zentroide dargestellt. Im Radverkehr beträgt der RelVarK im Gelegenheitstyp *Apotheke* (23,9 km²) und unter Verwendung geometrischer Zentroide 0,101. Dieser reduziert sich auf 0,07 bei einer Verwendung gewichteter Mittelpunkte. Folglich werden die realen Erreichbarkeitsverhältnisse unter Verwendung gewichteter Zentroide besser repräsentiert. Werden jedoch die Erreichbarkeitswerte der bewohnten 100-Meter-Zellen

Abbildung 47: RelVarK mit geometrischen und gewichteten Zentroiden

Dargestellt ist der RelVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus und der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen. Der Linienvorlauf zeigt die mittlere gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten im Verhältnis zur berechneten Reisezeit im 500-Meter-Raster für geometrische und gewichtete Zentroide. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.



aggregiert, ergibt sich ein eVarK von 0,059 (vgl. Abbildung 42). Mit gewichteten Zentroiden ist es also möglich, eine bessere räumliche Repräsentativität von Erreichbarkeitswerten zu erzielen, die mögliche Genauigkeit bei der Aggregation von Einzelwerten wird jedoch nicht erreicht. Tabelle 35 zeigt außerdem, dass dieser Befund bei ungewichteten RelVarK für alle Verkehrsmodi und unabhängig vom Vergleichssystem gültig ist. Gleichwohl führt die Verwendung gewichteter Zentroide in keinem Anwendungsfall dazu, dass eine deutlich geringere Auflösung weiterhin genaue Erreichbarkeitswerte liefert.

In den bisherigen Analysen erfolgte die Gewichtung der RelVarK aller Raumeinheiten in den Vergleichssystemen unabhängig von der Einwohnerzahl (vgl. Gleichung 14). Wie in Abschnitt 5.2.1 gezeigt, weist die räumliche Aggregation gegenüber der Bevölkerung eine höhere Fehleranfälligkeit auf. Die Frage ist also, ob einwohnergewichtete Zentroide auch gegenüber der Bevölkerung zu repräsentativeren Erreichbarkeitswerten führen. Ein Vergleich zwischen den EWRelVarK auf Basis von geometrischen und gewichteten Zentroiden zeigt, dass gewichtete Zentroide im Mittel zu keiner Verbesserung führen, unabhängig vom Modus und vom Vergleichssystem (vgl. Tabelle 36). Hingegen weisen für gewichtete Zentroide berechnete Erreichbarkeiten im ÖV und Radverkehr eine leicht geringere Genauigkeit auf Gemeindeebene auf.

Tabelle 36: VarK über alle Gelegenheitstypen für geometrische und gewichtete Zentroide

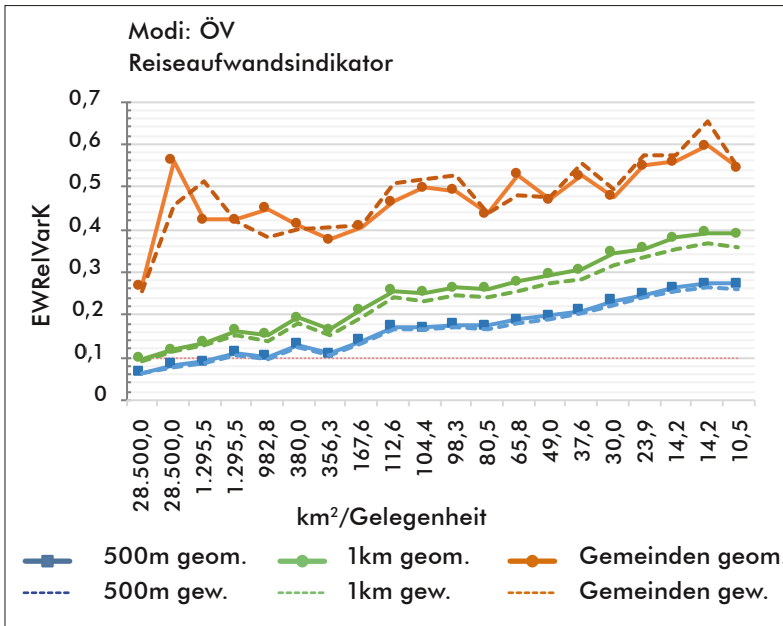
Messwerte	500-Meter-Raster				Gemeinden			
	MIV	ÖV	Fuß	Rad	MIV	ÖV	Fuß	Rad
RelVarK (geom.)	0,035	0,114	0,146	0,075	0,149	0,312	0,823	0,288
RelVarK (gew.)	0,026	0,079	0,121	0,056	0,143	0,267	0,652	0,271
EWRelVarK (geom.)	0,062	0,170	0,215	0,167	0,338	0,473	0,834	0,719
EWRelVarK (gew.)	0,061	0,164	0,215	0,164	0,336	0,479	0,808	0,758

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 48 zeigt den Einfluss der Einwohnergewichtung auf den EWRelVarK für den ÖV in unterschiedlichen Vergleichssystemen. Entscheidend ist die nur geringe Zunahme der Repräsentativität von Erreichbarkeitswerten gegenüber der Bevölkerung bei der Verwendung gewichteter Zentroide. Beispielsweise reduziert sich der EWRelVarK für Hausärzte (14,2 km²/Gelegenheit) auf Gemeindeebene von 0,653 (geometrisch) auf 0,597. Bei den meisten Gelegenheitstypen bleibt der EWRelVarK jedoch nahezu konstant. Lediglich in den Rastermodellen ist ein schwacher Genauigkeitserfolg festzustellen.

Abbildung 48: EWRelVarK mit geometrischen und gewichteten Zentroiden im ÖV

Dargestellt ist der RelVarK im ÖV in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung des Vergleichssystems und der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen. Der Linienverlauf zeigt die um die Einwohnerzahl in den Vergleichssystemen gewichtete mittlere gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten im Verhältnis zur berechneten Reisezeit in den Vergleichssystemen für geometrische und gewichtete Zentroide. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.



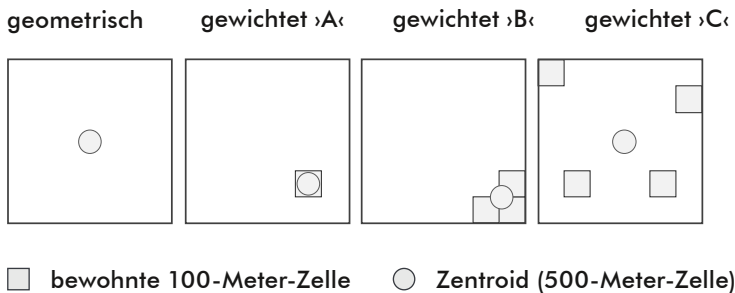
Quelle: eigene Darstellung

Ein noch schwächerer Effekt zeigt sich bei der Berücksichtigung des MIV (nicht dargestellt). Auch hier ist es nicht möglich, eine wesentlich höhere Repräsentativität von Erreichbarkeitswerten mit Hilfe der Verwendung gewichteter Zentroide zu erzielen. Zwei Gründe sind ausschlaggebend für die geringe Relevanz einwohnergewichteter Zentroide bei der Berechnung von repräsentativen Erreichbarkeiten für die Bevölkerung.

a) *Geringe Justierung in dicht bewohnten Gebieten*

Die Lage der einwohnergewichteten Zentroide wird von der Einwohnerverteilung in den Raumeinheiten beeinflusst (vgl. Abbildung 49). Prinzipiell unterscheidet sich die Lage zwischen gewichteten und geometrischen Zentroiden gerade dann, wenn die Einwohnerverteilung innerhalb einer Raumeinheit eine deutliche räumliche Klumpung aufweist (gewichteter A und B). Sind jedoch zahlreiche bewohnte Rasterzellen vorhanden, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit zugunsten einer dispersen Verteilung (gewichteter C). Eine solche Verteilung führt in der Tendenz jedoch dazu, dass sich der gewichtete Zentroid kaum verschiebt und folglich keine genaueren Erreichbarkeitswerte mit einer erhöhten Repräsentativität gegenüber den Einwohnern ermittelt werden können.

Abbildung 49: Gewichtung von Zentroiden



Quelle: eigene Darstellung

b) Reduzierte Repräsentativität in dicht bewohnten Gebieten

Der Verwendung einwohnergewichteter Zentroide liegt die Annahme zugrunde, dass sie die Repräsentativität von Erreichbarkeitswerten erhöhen. Diese Schlussfolgerung ist, wie Abbildung 48 zeigt, gerade im ÖV und auf Gemeindeebene häufig nicht zulässig, da die EWRelVarK für gewichtete Zentroide häufig oberhalb der Werte für geometrische Zentroide liegen. Beispielsweise befinden sich in Neumünster insgesamt 2.577 bewohnte 100-Meter-Rasterzellen mit einer durchschnittlichen ÖV-Reisezeit von 13,05 Minuten (einwohnergewichtet: 11,42 Minuten) zum nächsten Hausarzt. Für den geometrischen Zentroiden der Gemeinde liegt dieser Wert bei 12 Minuten, für den einwohnergewichteten Zentroiden indes bei einer Reisezeit von sechs Minuten. Entsprechend repräsentiert der Erreichbarkeitswert des geometrischen Zentroiden die tatsächlichen Erreichbarkeitsverhältnisse wesentlich besser.

In 36,4% aller Gemeinden mit 70,5% der Einwohner besitzt die für einen gewichteten Zentroiden berechnete schnellste ÖV-Reisezeit zum nächsten Hausarzt eine geringere Repräsentativität gegenüber den Einwohnern, als der Vergleichswert unter Verwendung geometrischer Zentroide. Zudem liegt in 66,34% aller Gemeinden mit 87,02% der Einwohner der mit einem gewichteten Zentroiden berechnete Erreichbarkeitswert unterhalb der MRE. Hingegen liegen bei Verwendung eines geometrischen Zentroiden nur 30,36% aller Werte mit 32,84% der Einwohner unterhalb der MRE. Gleichwohl sind die mittleren Abweichungen nahezu identisch. Gerade in Gebieten mit einer hohen Bevölkerungszahl führt die Verwendung von einwohnergewichteten Zentroiden also zu einem Unterschätzen der realen Raumwiderstände. Geometrische Zentroide führen hingegen eher zu einem Überschätzen der Raumwiderstände.

Schlussfolgerungen

Gewichtete Zentroide erfordern zwangsläufig die Verwendung von Geodaten, die die räumliche Auflösung des Bezugssystems übersteigen. Dieser zusätzliche Datenbedarf kann aber nicht immer gedeckt werden. Zudem müssen geeignete Gewichtungsalgorithmen verfügbar sein. Es stellt sich die Frage, ob der realisierte Genauigkeitsgewinn diesen zusätzlichen Aufwand rechtfertigt.

Die Auswertungen zeigen, dass gewichtete Zentroide nicht immer eine höhere Genauigkeit erzeugen. Wird Erreichbarkeit ausschließlich als eine Eigenschaft von Standorten verstanden und kartographisch dargestellt, reduzieren gewichtete Zentroide vor allem im ÖV, Rad- und Fußverkehr die auftretenden Aggregationsfehler um bis zu 50 Prozent. Gerade bei Gelegenheitstypen mit vielen Einrichtungen sind diese Effekte besonders ausgeprägt. Für die Bestimmung der Naherreichbarkeit im Langsamverkehr sind gewichtete Zentroide also ein geeigneter Ansatz, um die Qualität von Erreichbarkeitsdarstellungen zu verbessern. Wesentlich geringer sind die Effekte im MIV, da auch geometrische Zentroide nur geringe Aggregationsfehler erzeugen.

Sollen Erreichbarkeiten jedoch für die Wohnbevölkerung ermittelt werden, reduziert sich der positive Einfluss gewichteter Zentroide erheblich. In Raumeinheiten mit einer hohen und dispers verteilten Bevölkerungszahl ist der Einfluss geometrischer und gewichteter Zentroide häufig nahezu identisch. Hinzu kommt, dass die Lage von gewichteten Zentroiden vielfach zu einem Unterschätzen der Reisezeit und folglich einem Überschätzen der realen Erreichbarkeitsverhältnisse führt. Die Gewichtung von Zentroiden reduziert in zahlreichen Raumeinheiten die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen.

5.2.3 Einordnung der Ergebnisse

Unterschiedliche Untersuchungen geben an, dass die Erreichbarkeit in Gebieten mit einer geringen Auflösung und insbesondere in Vektormodellen eher unterschätzt wird (Dalvi & Martin 1976, S. 37; Hillsman & Rhoda 1978, S. 75ff.). Für Gemeindegewerke berechnete Reisezeiten zu nächsten Gelegenheiten liegen demnach zumeist über den realen Werten. Dieser Befund wird auch von einer aktuellen Studie bestätigt. In dieser wird die Erreichbarkeit auf Gemeindeebene mit jener auf Raster-Ebene (1km²) verglichen (Stępnik & Rosik 2015, S. 237). Die genannten Untersuchungen wurden jedoch ohne den Vergleich mit einer sehr hohen Referenzauflösung durchgeführt. Folglich ist es nicht möglich, die von der räumlichen Auflösung abhängenden Erreichbarkeitswerte auf ihre Gültigkeit zu überprüfen. Der in dieser Arbeit verwendete Untersuchungsansatz erlaubt hingegen den Vergleich von Erreichbarkeitswerten

in unterschiedlichen Modellkonfigurationen mit einer sehr hohen Referenzauflösung und in Relation zur Bevölkerungszahl.

Der Vergleich der im bewohnten 100-Meter-Raster ermittelten Reisezeiten mit jenen, die in den Vergleichssystemen berechneten wurden zeigt, dass gerade im ÖV die räumliche Aggregation zu einem deutlichen Überschätzen der realen Reisezeiten führt (vgl. Tabelle 37). Folglich liegen die realen Reisezeiten zumeist unterhalb der im Modell berechneten Werte. Auch zeigen sich in niedrig aufgelösten Rastermodellen zu den Vektormodellen vergleichbare Abweichungen. Nur im 500-Meter-Raster und bei Berechnungen im MIV führt die räumliche Aggregation zu einem schwachen strukturellen Überschätzen der Reisezeiten. Eine geringe räumliche Auflösung führt also zu einem relativen Unterschätzen von Reisezeiten im MIV in Relation zum ÖV und NMIV. Dieses Ergebnis ergänzt das von Salonen & Toivonen (2013, S. 150) identifizierte relative Unterschätzen von MIV-Reisezeiten in sehr einfachen Verkehrsgraphen.

Tabelle 37: Anteil der Reisezeiten, die oberhalb der Referenzwerte liegen (geom. Zentroide)

Die Werte wurden über alle Gelegenheitstypen in den Vergleichssystemen für jeden Verkehrsmodus gemittelt; alle Angaben in Prozent; fett: Werte $\geq 60,0$; unterstrichen: Werte $\geq 70,0$

Modus	500-Meter	1-Kilometer	5-Kilometer	stat. Gebiete	Gemeinden
MIV	50,890	54,240	58,700	60,300	52,980
ÖV	64,690	<u>76,635</u>	<u>80,425</u>	62,945	<u>73,155</u>
Fuß	59,360	69,455	<u>90,180</u>	55,760	<u>76,620</u>
Rad	57,330	62,400	<u>70,580</u>	54,345	64,425

Quelle: eigene Darstellung

Die Verwendung gewichteter Zentroide führt hingegen zu einem strukturellen Unterschätzen der realen Reisezeiten (vgl. Tabelle 38). Gerade die im 500-Meter-Raster und im 1-Kilometer-Raster berechneten Reisezeiten unterschreiten die realen Werte häufig. Dieser Befund bleibt auch dann unverändert, wenn bei der Berechnung der mittleren Reisezeiten im 100-Meter-Raster eine Gewichtung um die Einwohnerzahl

erfolgt (nicht dargestellt). Im 5-Kilometer-Raster kommt als Besonderheit hinzu, dass die Reisezeiten im MIV eher unterschätzt und im ÖV sowie Fußverkehr überschätzt werden.

Die Nutzung einer solchen Raumauflösung würde also zu einem deutlichen relativen Überschätzen der MIV-Erreichbarkeit führen. Hier zeigt sich abermals, dass die Verwendung einwohnergewichteter Zentroide die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen nicht zwangsläufig erhöht (vgl. Abschnitt 5.2.2). Auch Hewko et al. (2002, S. 1195) kamen bereits zu diesem Ergebnis, jedoch ohne einen Vergleich verschiedener Raumbezugssysteme und ausschließlich unter Verwendung von Luftliniendistanzen. Insofern ist das von Dalvi & Martin (1976, S. 37) und Hillsman & Rhoda (1978, S. 75ff.) postulierte Unterschätzen der Raumwiderstände in stark aggregierten Raumeinheiten nur dann gültig, wenn Reisezeiten des MIV und Radverkehrs auf Ebene von Gemeinden oder einem 5-Kilometer-Raster berechnet werden. Gerade die Verwendung geometrischer Zentroide führt in den Vektormodellen jedoch zu einem auffälligen Überschätzen der realen Raumwiderstände.

Eine Ursache für die Fehleranfälligkeit der Erreichbarkeitsberechnung in aggregierten Raumeinheiten ist das unvermeidbare Wirken des Zentroidproblems (Dalvi & Martin 1976, S. 32ff.; Hewko et al. 2002, S. 1188ff.). Mit Hilfe geometrischer und gewichteter Zentroide lassen sich reale Raumwiderstände nur eingeschränkt mit einer hohen Verallgemeinerbarkeit abbilden. Ein wesentliches Hindernis ist die unerwartet geringe Repräsentativität von einwohnergewichteten Zentroiden in dicht besiedelten Gebieten (vgl. Abschnitt 5.2.2). Hewko et al. (ebd., S. 1195) betonen außerdem, dass auch bei der Einwohnergewichtung von Zentroiden unrealistisch kurze Distanzen bestehen bleiben. Da die auf Basis gewichteter Zentroide berechneten Distanzen in der Regel die Entfernungen im Referenzsystem unterschreiten, bestätigen die durchgeführten Analysen diesen Befund (vgl. Tabelle 38). Eine begrenzte Ungenauigkeit muss also in Kauf genommen werden. Gleichwohl stellt sich die Frage, in welchem Umfang auch das Eigenpotenzialproblem und das Grenzproblem eine Wirkung entfalten. Immerhin zeigen die Analysen deutlich, dass weder geometrische noch gewichtete Zentroide in der Lage sind, die mit dem eVarK hergeleitete theoretische Genauigkeit zu erzielen (vgl. Tabelle 35 und Tabelle 36).

Tabelle 38: Anteil der Reisezeiten, die oberhalb der Referenzwerte liegen (gew. Zentroide)

Die Werte wurden über alle Gelegenheitstypen in den Vergleichssystemen für jeden Verkehrsmodus gemittelt; alle Angaben in Prozent; fett: Werte $\geq 60,0$; unterstrichen: Werte $\leq 40,0$

Modus	500-Meter	1-Kilometer	5-Kilometer	stat. Gebiete	Gemeinden
MIV	<u>37,845</u>	<u>38,035</u>	<u>38,465</u>	56,560	<u>31,450</u>
ÖV	<u>32,460</u>	<u>37,735</u>	63,710	55,930	46,515
Fuß	40,930	45,930	69,870	47,830	61,525
Rad	<u>35,650</u>	<u>36,910</u>	45,415	45,485	<u>33,040</u>

Quelle: eigene Darstellung

Aufgrund der Ähnlichkeit vom Grenz- und Eigenpotenzialproblem ist keine differenzierte Wirkungsanalyse möglich. In beiden Fällen führt die Bindung von Interaktionen an einen Zentroiden zur Fehlzuzuweisung nächster Gelegenheiten (vgl. Abschnitt 2.2.3.3). Diese Fehler treten beispielsweise auf, wenn von einer 100-Meter-Rasterzelle Hausarzt A auf dem schnellsten Weg erreicht wird, vom Zentroiden der zugehörigen Gemeinde jedoch Hausarzt B. Um beide Wirkungen in ihrem Umfang abzuschätzen, wurde für alle bewohnten 100-Meter-Zellen der Anteil der Fehlzuzuweisungen ermittelt (vgl. Gleichung 16).

Gleichung 16

$$F_v^{Gtyp} = \frac{\sum_{k=1}^n g(R_k^G)}{n} \text{ mit } g(R_k^G) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } R_k^G <> RE_i^G \\ 0 & \text{wenn } R_k^G = RE_i^G \end{cases} \text{ für } \{R_k^G | \subseteq RE_i^G\}$$

F_v^{Gtyp} = Anteil der Fehlzuzuweisungen im Gelegenheitstyp Gtyp im Vergleichssystem v

R_k^G = Zuweisung zu Gelegenheit G in Rasterzelle k (bewohnte 100-Meter-Zelle)

RE_i^G = Zuweisung zu Gelegenheit G in Raumeinheit i

Beispiel: In einer Gemeinde liegen zehn bewohnte 100-Meter-Zellen. Aus sechs dieser Zellen ist Arzt A und aus vier Arzt B am schnellsten erreichbar. Vom geometrischen Zentroiden der Gemeinde wird Arzt B am schnellsten erreicht. Entsprechend beträgt die Fehlzuweisung von Referenzzellen zum nächsten Arzt 0,6 bzw. 60%. Folglich führen das Grenz- und das Eigenpotenzialproblem dazu, dass 60% der Referenzstandorte einer falschen Gelegenheit zugeordnet werden. Der Anteil von Fehlzuweisungen gibt auch einen Hinweis darauf, welche Effekte die VarK beeinflussen. Über den Anteil von Fehlzuweisungen kann die Wirkstärke des Grenzproblems und mithin des Zoneneffekts eingeschätzt werden.

Die Auswertungen zeigen die starke Abhängigkeit von Grenz- und Eigenpotenzialproblemen von der räumlichen Auflösung (vgl. Tabelle 39). Mit einer Zunahme der durchschnittlichen Gebietsgröße steigt die Wahrscheinlichkeit von Fehlzuweisungen also deutlich an. Diese Ergebnisse decken sich auch mit den in anderen Studien präsentierten Einschätzungen

Tabelle 39: Anteil der Fehlzuweisungen von Gelegenheiten bei geometrischen und gewichteten Zentroiden

Die Werte wurden über alle Gelegenheitstypen in den Vergleichssystemen für jeden Verkehrsmodus gemittelt; alle Angaben in Prozent; fett: Werte $\leq 10,0$; unterstrichen: Werte $\geq 20,0$

	Modus	500-Meter	1-Kilometer	5-Kilometer	stat. Gebiete	Gemeinden
geom. Zentroid	MIV	3,475	6,575	<u>24,765</u>	17,615	<u>30,245</u>
	ÖV	4,450	8,320	<u>31,655</u>	<u>20,885</u>	<u>35,780</u>
	Fuß	4,890	9,165	<u>31,045</u>	17,480	<u>46,030</u>
	Rad	3,720	6,985	<u>25,340</u>	18,380	<u>34,770</u>
gewichteter Zentroid	MIV	3,220	5,885	<u>23,800</u>	17,145	<u>30,065</u>
	ÖV	4,125	7,590	<u>28,800</u>	<u>20,325</u>	<u>34,355</u>
	Fuß	4,740	8,615	<u>30,770</u>	16,800	<u>45,590</u>
	Rad	3,470	6,170	<u>24,715</u>	17,695	<u>34,275</u>

Quelle: eigene Darstellung

(Warntz 1979, S. 11). Darüber hinaus steigen die Fehlzusweisungen mit der Einrichtungsdichte, wie von Hewko et al. (2002, S. 1195) bereits gezeigt, unabhängig vom Verkehrsmodus und Raumbezug (nicht dargestellt). Eine hohe Einrichtungsdichte erhöht also die Wahrscheinlichkeit für Fehlzusweisungen.

Insgesamt ist nur ein geringer Einfluss des betrachteten Verkehrsmodus auf die Menge von Fehlzusweisungen zu erkennen. Auch die Einwohnergewichtung der Zentroide reduziert die Anzahl der Fehlzusweisungen nur in einem geringen Umfang. Es ist also davon auszugehen, dass das Zentroidproblem eher bei einer hohen Auflösung eine dominierende Wirkung entfaltet. Aggregationsfehler kommen hier primär aufgrund einer reduzierten Auflösung räumlicher Interaktionen zustande (Dalvi & Martin 1976; Hillsman & Rhoda 1978). Eine weitere Erhöhung der räumlichen Auflösung kann das Zentroidproblem reduzieren. Bei geringeren Auflösung bleibt dieses zwar bestehen, wird in seiner Wirksamkeit aber vom Grenz- und Eigenpotenzialproblem überlagert. Die geringen Unterschiede bei den Fehlzusweisungen zwischen den einzelnen Verkehrsmodi deuten darauf hin, dass das Zentroidproblem insbesondere im MIV eine relativ geringe Wirkung entfaltet, da dieser von einer sehr hohen räumlichen Auflösung am wenigsten profitiert.

5.3 Multimodale Verkehrsgraphen

Wie bereits in Abschnitt 5.2 gezeigt, weisen die einzelnen Verkehrsmodi unterschiedlich große Aggregationsfehler auf. In den nächsten Abschnitten wird geklärt, welche Besonderheiten diese Unterschiede erklären und inwiefern die Detaillierung von Verkehrsgraphen mit diesen korrespondiert. Dafür werden die Verkehrsgraphen der einzelnen Verkehrsmodi in unterschiedlichen Detaillierungsstufen aufgebaut und die resultierenden Aggregationsfehler in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung verglichen (vgl. Tabelle 5). Im Zentrum steht die Frage, ob detaillierte Graphen eine hohe räumliche Auflösung erfordern, um räumlich differenzierte Erreichbarkeitswerte abzubilden. Schließlich widmet sich Abschnitt 5.3.4 der räumlichen Variation von Erreichbarkeitswerten in Abhängigkeit vom verwendeten Widerstandsattribut im Individualverkehr sowie der Rundung von Reisezeiten und Reiseweiten.

5.3.1 Die Haltestellenanbindung im ÖV

Zusammen mit dem Fußverkehr erzeugt der öffentliche Verkehr die höchsten VarK und profitiert insofern besonders stark von einer hohen räumlichen Auflösung (vgl. Tabelle 35). Die Verwendung geometrischer Zentroide führt zu einem Überschätzen und die Verwendung gewichteter Zentroide eher zu einem Unterschätzen der realen Reisezeiten (vgl. Tabelle 37 und Tabelle 38). Auffällig ist außerdem, dass der Nutzen einwohnergewichteter Zentroide gerade im 1-Kilometer- und 5-Kilometer-Raster besonders ausgeprägt ist (nicht dargestellt).

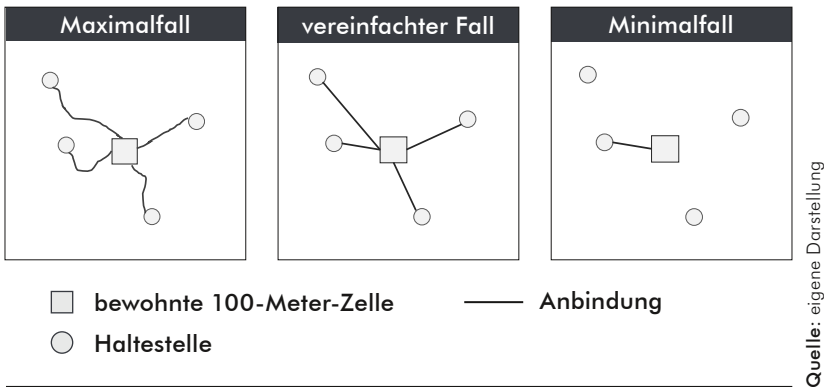
Der wesentliche Unterschied zum Individualverkehr ist die grundsätzliche Intermodalität der ÖV-Verkehrsgraphen, da die Anbindung der Haltestellen zumeist als Fußverkehr modelliert wird (vgl. Abschnitt 3.5.1). Die Berücksichtigung des Tür-zu-Tür-Ansatzes auf allen Verkehrsgraphen ermöglicht eine realistische Abbildung der relativen Erreichbarkeitsunterschiede zwischen dem ÖV und dem MIV (Salonen & Toivonen 2013, S. 150). Gerade die fußläufige Anbindung der Standorte an zahlreiche Haltestellen erhöht die ÖV-Erreichbarkeit beträchtlich (Djurhuus et al. 2016, S. 13). Insgesamt profitiert der ÖV in der Erreichbarkeitsmodellierung also von einer hohen Detaillierung. Die Implementierung der fußläufigen Haltestellenanbindung erfordert aber auch ein engmaschiges Fußwegenetz und den Einsatz eines Routingalgorithmus. Darüber hinaus sind bei der Anbindung mehrerer Haltestellen zahlreiche Verbindungsoptionen zu vergleichen.

Untersuchungsfälle

Um die Wirkung der Haltestellenanbindung auf die Variation von Erreichbarkeitswerten auf kleinräumiger Ebene zu untersuchen, kommen drei Detaillierungsstufen zur Anwendung (vgl. Tabelle 5). Der Maximalfall (1) entspricht dem bisher verwendeten Tür-zu-Tür-Ansatz mit einer fußläufigen Anbindung der nächsten sechs Bus- und drei Bahnhaltestellen innerhalb von höchstens 20 Minuten (vgl. Tabelle 16). Im vereinfachten Fall (2) erfolgen die Anbindung der nächsten sechs Bus- und drei Bahnhaltestellen auf Basis von Luftlinien. Die maximale Gehzeit von 20 Minuten entspricht bei einer mittleren Gehgeschwindigkeit (inkl. Ampeln etc.) von 4 km/h einer Entfernung von rund 1,3 Kilometern. Unter

Berücksichtigung eines Umwegfaktors von 1,2 führt dies zu einer maximalen Luftlinienentfernung von etwa 1,1 Kilometern (FGSV 2014, S. 23). Im Minimalfall (3) erfolgt die Anbindung der nächsten Haltestelle über die Luftlinienentfernung (vgl. Abbildung 50).

Abbildung 50: Untersuchungsfälle der Haltestellenanbindung im ÖV



Ergebnisse

Bei einer Reduzierung der Modelldetaillierung steigt die räumliche Variation der Erreichbarkeitswerte (vgl. Tabelle 40). Gleichwohl sind die Unterschiede bei niedrigen Auflösungen auch unter Berücksichtigung der Einrichtungsdichte gering (vgl. Abbildung 51). Lediglich im 500-Meter-Raster liegt die räumliche Variation im vereinfachten und im Minimalfall schon bei wenigen Zielen oberhalb des Referenzwertes. Eine hohe Detaillierung des ÖV-Verkehrsgraphen führt also zu einer Glättung der in den Raumeinheiten ermittelten Erreichbarkeitswerte.

Bei einem näheren Blick auf die Erreichbarkeitswerte in den einzelnen Detaillierungsstufen zeigen sich gerade im 500-Meter-Raster zahlreiche Erreichbarkeits sprünge. Als Sprung werden räumlich angrenzende Flächen mit deutlich unterschiedlichen Erreichbarkeitswerten bezeichnet. Diese reduzieren die Interpretierbarkeit der Ergebnisse und deuten auf Ungenauigkeiten hin.

Tabelle 40: RelVarK im ÖV in Abhängigkeit vom Modellierungsansatz

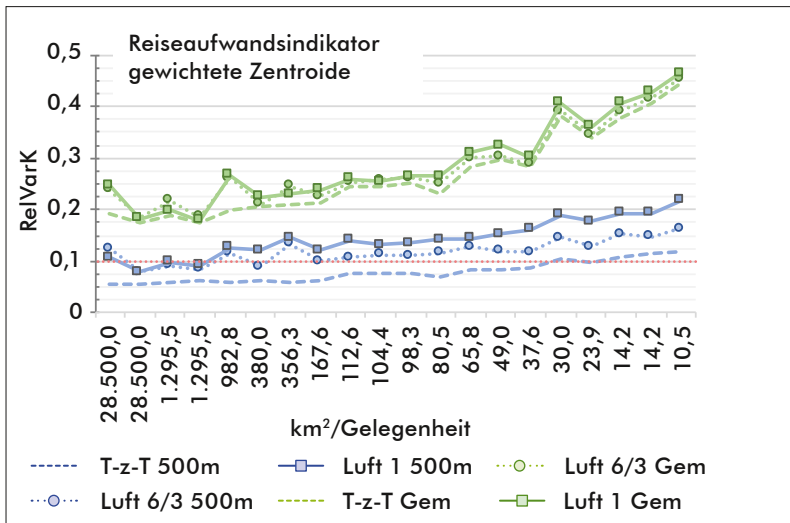
Die Werte wurden über alle Gelegenheitstypen in den Vergleichssystemen für jeden Verkehrsmodus gemittelt; fett: Werte $\leq 0,2$; unterstrichen: Werte $\geq 0,4$; geom. = geometrisch; gew. = gewichtet

	Ansatz	500-Meter	1-Kilometer	5-Kilometer	stat. Gebiete	Gemeinden
geom. Zentroid	Tür-zu-T	0,114	0,194	<u>0,426</u>	0,247	0,312
	Luft 6/3	0,154	0,23	<u>0,466</u>	0,338	0,342
	Luft 1	0,160	0,215	<u>0,419</u>	0,307	0,317
gewichteter Zentroid	Tür-zu-T	0,079	0,12	0,333	0,228	0,267
	Luft 6/3	0,119	0,146	0,359	0,307	0,284
	Luft 1	0,144	0,168	0,345	0,292	0,29

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 51: RelVarK im ÖV in Abhängigkeit vom Modellierungsansatz

T-z-T = Tür-zu-Tür-Ansatz; Luft 6/3 = Luftlinie zu nächsten sechs Bus- und drei Bahnhaltstellen; Luft 1: Luftlinie zur nächsten Haltestelle; Gem = Gemeindeebene; Dargestellt ist der RelVarK im ÖV in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung des Vergleichssystems, der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen und dem gewählten Modellierungsansatz. Der Linienvorlauf zeigt die mittlere gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten im Verhältnis zur berechneten Reisezeit in den Vergleichssystemen (500-Meter-Raster oder Gemeinden). Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.



Quelle: eigene Darstellung

Zwei Effekte verursachen die genannten Sprünge:

a) die maximale Anbindungszeit von 20 Minuten

Deutlich Sprünge entstehen unter anderem dann, wenn eine Raumeinheit noch an eine entfernte Haltestelle mit einem guten Angebot angebunden wird, diese Haltestelle für die sich anschließende Raumeinheit aber nicht mehr erreichbar ist. Dieser Effekt ist gerade bei der einfachen Anbindung im Minimalfall besonders ausgeprägt. Im bewohnten 100-Meter-Raster liegen auf rund 2,1% der besten Verbindungen die Anbindungszeiten der Rasterzellen oberhalb von 17 Minuten. Im 500-Meter-Raster erhöht sich dieser Wert auf 11,2%. Es ist davon auszugehen, dass eine höhere maximale Anbindungszeit zu einer weiteren Glättung des Angebotes führen würde. Zu bedenken ist aber auch, dass bereits die verwendete Anbindungszeit von 20 Minuten kaum mit beobachteten Wegen übereinstimmt (vgl. Abschnitt 3.5.1). Um Erreichbarkeits sprünge zu vermeiden ist zudem der vollständige Verzicht auf eine maximale Anbindungszeit denkbar.

b) die maximal angebotenen Haltestellen

Denkbar ist außerdem, dass die Anzahl der angebotenen Haltestellen nicht ausreicht, um alle besten Verbindungsoptionen einzuschließen. Es ist zu vermuten, dass beispielsweise die Anbindung der nächsten zehn Bus- und fünf Bahnhaltestellen zu einer zusätzlichen Glättung der Ergebnisse bei einem gleichzeitigen Genauigkeitsgewinn führt.

Schlussfolgerungen

Bei einer Verringerung der Detaillierung des ÖV-Verkehrsgraphen erhöht sich die räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten aufgrund des Auftretens von Erreichbarkeits sprünge. Diese Sprünge weichen von den Realbedingungen ab und werden von den Modellannahmen verursacht. Es hat sich gezeigt, dass auch die Anzahl der maximal angebotenen Haltestellen nicht immer die Ausgabe der besten Verbindungsoptionen gewährleistet. Insofern könnte eine Steigerung der Detaillierung generell zu einer Senkung der räumlichen Variation beitragen. Erreichbarkeits sprünge bedeuten außerdem, dass die Erreichbarkeitsberechnung gering aufgelöster Raumeinheiten in starkem Maße von der Lage der Zentroide beeinflusst ist. Geringe Langeabweichungen können die Erreichbarkeitswerte bereits stark beeinflussen.

Wenn das Modell auf gewichteten Zentroiden im Tür-zu-Tür-Ansatz basiert, kann in der Regel auf ein 500-Meter-Raster zurückgegriffen werden. Wird der Verkehrsgraph jedoch vereinfacht, reduziert sich die Zuverlässigkeit der ermittelten Erreichbarkeitswerte. Aufgrund der Erreichbarkeits sprünge sind starke Abweichungen von den Realbedingungen denkbar. Anders als ursprünglich angenommen gilt, dass ein gering detaillierter ÖV-Verkehrsgraph in Kombination mit einer hohen räumlichen Auflösung einzusetzen ist.

5.3.2 Distanzberechnung im Fuß- und Radverkehr

Der Verkehrsgraph des NMIV basiert auf Netzdaten aus OSM (vgl. Abschnitt 3.5.3). Die Netzaufbereitung erzeugt einen hohen und mit der Integration von Höhendaten weiter steigenden Aufwand. Die Widerstandsberechnung auf einem realen Netzwerk erfordert außerdem den Einsatz eines Routingalgorithmus. Eine mögliche Vereinfachung ist die Widerstandsberechnung auf Basis von Luftliniendistanzen (Hewko *et al.* 2002, S. 1187).

Um den Einfluss der Widerstandsberechnung zu quantifizieren, werden die auf einem realen Fuß- und Radwegenetz (Maximalfall) ermittelten Distanzen mit den Luftlinienentfernungen (Minimalfall) verglichen. Wie in Abschnitt 5.3.4 gezeigt, lassen sich diese Distanzen im NMIV ohne wesentliche Genauigkeitsverluste direkt in Reisezeiten übersetzen. Fraglich ist, ob die in den Vergleichssystemen ermittelten Luftlinienweiten eine vergleichbare Abweichung von der MRE aufweisen, wie die auf dem Wegenetz berechneten Distanzen. Die MRE entspricht der mittleren Reiseweite zu nächsten Einrichtungen im Referenzsystem und unter Berücksichtigung realer Wege.

Wenn die Erreichbarkeit unter Verwendung von Luftliniendistanzen ermittelt wird, ergeben sich bereits im 500-Meter-Raster deutliche Abweichung von der MRE. Diese liegen in zumeist deutlich oberhalb der im Realnetz ermittelten Abweichungen (vgl. Tabelle 41). Dieser Befund bedeutet auch, dass die Genauigkeit der mit Hilfe von Luftlinienweiten ermittelten Erreichbarkeiten bei einer niedrigen Auflösung deutlich abnimmt. Bereits die im 1-Kilometer-Raster berechneten Werte weichen um rund 30% von der MRE und damit den realen Erreichbarkeitsverhältnissen

ab. Bei einer weiteren Reduktion der Auflösung erhöht sich dieser Wert auf maximal 93,0%. Gleichwohl sind auch im 500-Meter-Raster in den Gelegenheitstypen *Supermarkt*, *Hausarzt* und *Kita* Abweichung von mehr als 20% zu beobachten (nicht dargestellt).

Insofern ist im Bereich der Naherreichbarkeit die Qualität der Erreichbarkeitsberechnung auf Luftlinienebene im 500-Meter-Raster bereits deutlich eingeschränkt. Im Vergleich zu den Abweichungen im Realnetz sind nur bei einer sehr geringen Auflösung (5-Kilometer-Raster oder Gemeinden) vergleichbare Abweichungen festzustellen. Gleichwohl ist ihr Einsatz unabhängig vom Berechnungsverfahren nicht zu empfehlen. Die mittleren Abweichungen im Radverkehr sind wesentlich geringer, da innerhalb einer maximalen Reisezeit von 60 Minuten eine längere Strecke zurückgelegt wird und sich die relativen Abweichungen entsprechend reduzieren.

Tabelle 41: RelVarK im NMIV in Abhängigkeit vom Modellierungsansatz

Die Werte wurden über alle Gelegenheitstypen in den Vergleichssystemen für jeden Verkehrsmodus gemittelt; fett: Werte $\leq 0,2$; unterstrichen: Werte $\geq 0,4$; geom. = geometrisch; gew. = gewichtet

	Modi	Ansatz	500-Meter	1-Kilometer	5-Kilometer	Gemeinden
geom. Zentroid	Fuß	Maximalfall	0,149	0,244	<u>0,93</u>	<u>0,828</u>
		Minimalfall	0,269	0,294	<u>0,722</u>	<u>0,62</u>
	Rad	Maximalfall	0,076	0,122	0,387	0,291
		Minimalfall	0,298	0,306	<u>0,476</u>	<u>0,44</u>
gew. Zentroid	Fuß	Maximalfall	0,122	0,179	<u>0,73</u>	<u>0,649</u>
		Minimalfall	0,279	0,297	<u>0,636</u>	<u>0,556</u>
	Rad	Maximalfall	0,058	0,08	0,339	0,276
		Minimalfall	0,3	0,303	<u>0,491</u>	<u>0,456</u>

Quelle: eigene Darstellung

Entscheidend für die Variation ist auch die Wahl des Umwegfaktors. Entspricht dieser nicht der mittleren Abweichung zwischen Luftlinien und Realdistanzen, kommt es zu einer zusätzlichen Verzerrung bei der Erreichbarkeitsberechnung auf Basis von Luftlinienweiten. Bei den Berechnungen wurde ein Umwegfaktor von 1,2 verwendet (FGSV 2014, S. 23). In einer weiteren Berechnung wird untersucht, ob dieser Umwegfaktor die Realbedingungen hinreichend gut abbildet. In Tabelle 42 sind die mittleren Unterschiede zwischen Realdistanzen und Luftlinienweiten auf Ebene des 100-Meter-Rasters aufgeführt. Eine Gleichgewichtung der einzelnen Wegezwecke ergibt einen mittleren Umwegfaktor von 1,38. Die Wahl eines zu geringen Faktors hat also zu einer zusätzlichen Verzerrung der Erreichbarkeitswerte geführt. Eine wesentliche Reduktion der VarK konnte nach einer Neuberechnung mit einem Umwegfaktor von 1,38 indes nicht festgestellt werden (nicht dargestellt). Der im Vergleich zum üblichen Wert höhere Faktor kann bereits auf Ebene des 100-Meter-Rasters das Resultat des Zentroidproblems sein und muss nicht zwangsläufig zu einer Neubewertung herkömmlicher Umwegfaktoren führen.

Tabelle 42: Umwegfaktoren nach Gelegenheitstyp

Gelegenheitstyp	Umwegfaktor	Gelegenheitstyp	Umwegfaktor
Apotheke	1,26	Internist	1,42
Augenarzt	1,57	Kinderarzt	1,54
Bahnhof	1,27	Kita	1,26
Fernbahnhof	1,57	Krankenhaus	1,26
Flughafen	1,16	Mittelzentrum	1,24
Förderschule	1,75	Oberzentrum	1,31
Grundschule	1,33	Oberstufe	1,51
Hauptbahnhof	1,21	Orthopäde	1,55
Hausarzt	1,27	Supermarkt	1,28
Hochschule	1,32	weiterf. Schule	1,48
		Ø	1,38

Quelle: eigene Darstellung

5.3.3 Parkbezogene Reisezeiten im MIV

Die PRZ erzeugen einen Großteil der räumlichen Reisezeitvariation im MIV. Gerade in innerstädtischen Lagen können sich die anfallenden Reisezeiten bereits auf kleinräumiger Ebene deutlich unterscheiden. Außerdem hängen die Suchverkehre unmittelbar von der Tageszeit und den lokalen Kenntnissen der Autofahrer ab (Chaniotakis & Pel 2015, S. 233). Obwohl die PRZ in der Realität von enormer Bedeutung sind, sind ihrer genauen Berechnung nach wie vor hohe Hürden gesetzt (Benenson *et al.* 2008; Chaniotakis & Pel 2015). Zu diesen gehört die fehlende Lage und tageszeitliche Auslastung aller Stellflächen. Das Fehlen der PRZ führt in der Erreichbarkeitsmodellierung zumindest in innerstädtischen Lagen häufig zu einem systematischen Unterschätzen der Reisezeiten im MIV.

Die fehlenden Gehzeiten von und zu den Stellflächen sowie die fehlenden Parksuchverkehre glätten die berechneten Erreichbarkeitswerte aufgrund des Fehlens irregulär verteilter zusätzlicher Raumwiderstände (Benenson *et al.* 2008, S. 438). Dies zeigt sich u. a. daran, dass die Reiseweite im MIV eine im Vergleich zur Reiseweite wesentlich größere Streuung aufweist (vgl. Abschnitt 5.3.4).

Untersuchungsfälle

Um den Einfluss der PRZ auf die räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten zu untersuchen werden drei Vergleichsfälle gebildet. Der Maximalfall (1) entspricht der Modellierung der PRZ auf Basis unterschiedlicher Raumkategorien entsprechend der »*Richtlinien für integrierte Netzgestaltung*« (FGSV 2008, S. 47) (vgl. Abschnitt 3.5.2). Im vereinfachten Fall (2) werden die Reisezeiten im MIV um pauschal fünf Minuten verlängert. In der Minimalvariante (3) wird auf parkbezogene Reisezeitzuschläge komplett verzichtet.

Ergebnisse

In Abbildung 52 sind die RelVarK im MIV auf Ebene des 500-Meter-Rasters und in Abhängigkeit vom Umgang mit der PRZ dargestellt. Als Referenz dient die Verteilung unter Berücksichtigung der Reiseweite (vgl. Abschnitt 5.3.4). Die geringste räumliche Streuung von Erreichbarkeitswerten wird bei der Verwendung einer pauschalen PRZ von fünf

Minuten erzielt (vereinfachter Fall). Bei diesem Ansatz erhöht sich die Reisezeit auch auf sehr kurzen Wegen pauschal um fünf. Die absoluten Abweichungen von der MRE bleiben zwar bestehen, gleichwohl verlieren sie relativ erheblich an Bedeutung. Dabei ist zu bedenken, dass die mittleren reinen Fahrtzeiten im MIV lediglich 13,55 Minuten betragen. Ein Zeitaufschlag von fünf Minuten erhöht diesen Wert um 36,9%. Nur unwesentlich höher ist die Streuung unter Berücksichtigung einer deutlich differenzierteren PRZ (Maximalfall). In Abhängigkeit von der Relation erfolgt ein Zeitaufschlag zwischen zwei und sieben Minuten. Auch hier erhöht sich vor allem die absolute Reisezeit. Gleichwohl führt die räumliche Differenzierung zu einem leichten Anstieg des RelVarK. Deutlich höher sind die RelVarK bei einem völligen Verzicht auf die PRZ (Minimalfall). Abbildung 52 zeigt nun nahezu identische RelVarK für die Reisezeit und die Reiseweite. Diese Analysen zeigen, in welchem Umfang die vereinfachten Annahmen hinsichtlich der PRZ zu einer Glättung der tatsächlich vorhandenen Erreichbarkeitsunterschiede führen. Beachtenswert ist außerdem, dass dieser Befund auch in den übrigen Vergleichssystemen Gültigkeit besitzt.

Schlussfolgerungen

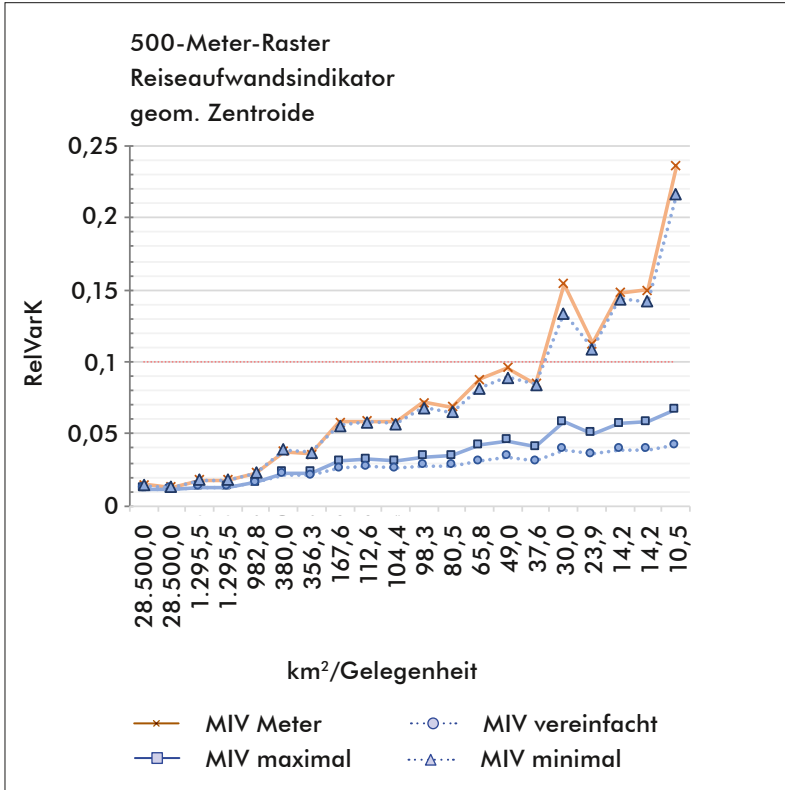
Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Glättung von Erreichbarkeitsunterschieden bei der Verwendung pauschaler Zeitaufschläge zur Abbildung der PRZ. Aufgrund dieser Glättung kann im MIV auf ein 500-Meter-Raster zur Berechnung von Erreichbarkeiten zurückgegriffen werden, da Erreichbarkeitsunterschiede im 100-Meter-Raster nahezu entfallen. Die Analysen zeigen einerseits, dass sich die eigentlich vorhandene relative Variation der MIV-Reisezeiten reduziert. Andererseits bedeutet ein völliger Verzicht auf PRZ aber auch ein relatives Unterschätzen der Reisezeiten im MIV.

5.3.4 Bedeutung der Widerstandsberechnung

Beste Wege im Individualverkehr sind zumeist schnellste oder kürzeste Verbindungen. Die Berechnung kürzester Wege hängt ausschließlich von der Geometrie der Verkehrsgraphen ab. Die Reisezeit ist hingegen ein Resultat aus zahlreichen Faktoren, die nicht immer ortsgenau zu bestimmen sind (vgl. Abschnitte 3,5.2 und 3,5.3). Es ist fraglich, ob die räumliche

Abbildung 52: RelVarK im MIV in Abhängigkeit vom Umgang mit PRZ

Dargestellt ist der RelVarK im MIV in Abhängigkeit von der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen und dem gewählten Modellierungsansatz. Abgebildet ist außerdem der RelVarK bei einer Berechnung der Reiseweite zur nächsten Einrichtung eines Gelegenheitstyps. Der Linienvverlauf zeigt die mittlere gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten MIV-Reisezeiten im Verhältnis zur berechneten Reisezeit im 500-Meter-Raster. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.



Variation von Erreichbarkeitswerten von der Widerstandsberechnung beeinflusst wird. Außerdem basieren Erreichbarkeitsuntersuchungen zumeist auf gerundeten oder klassifizierten Erreichbarkeitswerten. Im Folgenden wird untersucht, ob diese Generalisierung zu einer Glättung von Erreichbarkeitswerten führt und der Nutzen einer hohen Kleinaräumigkeit abnimmt.

Reisezeit und Reiseweite

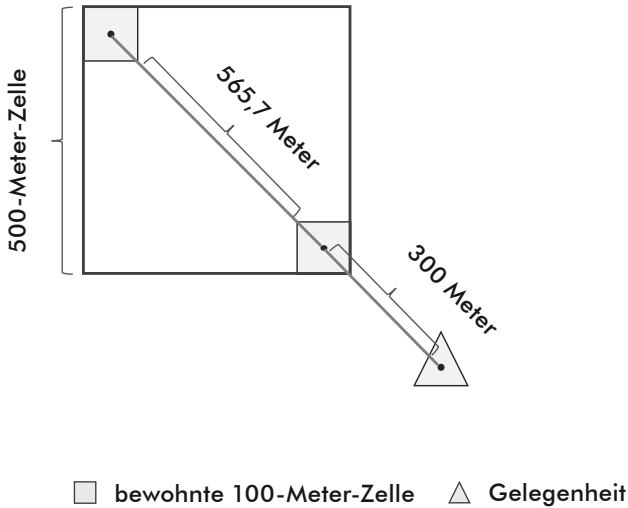
Die Variation zwischen den Reisezeiten zu nächsten Gelegenheiten ist auch geometrisch angelegt und resultiert nicht ausschließlich aus den modellierten Kanten- und Knotenwiderständen. Ausgehend von 100-Meter-Zellen liegt zwischen den minimalen Reiseweiten zur nächsten Gelegenheit innerhalb einer 500-Meter-Zelle eine maximale Luftlinienentfernung von 565,7 Metern (vgl. Abbildung 53). In einem realen Netzmodell kann sich dieser Wert weiter erhöhen. Die räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten ist also ein direktes Resultat des Zentroidproblems (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Demnach führt die Verwendung von Zentroiden zu einer ungenauen Darstellung von Interaktionen (Dalvi & Martin 1976, S. 32ff.). Da die Stärke des Zentroidproblems direkt aus der Größe von Raumeinheiten resultiert, hängt sein relativer Einfluss von der mittleren Entfernung zu nächsten Gelegenheiten ab. Bei geringen durchschnittlichen Entfernungen ist die relative Bedeutung der in Abbildung 53 skizzierten Verzerrung entsprechend hoch (vgl. Abschnitt 5.4). Dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass die identischen Verzerrungen auch unter Verwendung der Reisezeit entstehen.

Der in Abbildung 53 aufgeführte Lagefehler kann sich bei der Berechnung der Reisezeit jedoch verändern. Grundsätzlich ist eine zunehmende, abnehmende oder gleichbleibende Variation von Erreichbarkeitswerten denkbar. Die möglichen Unterschiede haben jeweils eigene Implikationen zur Folge.

a) Zunahme der Variation von Erreichbarkeitswerten auf Basis der Reisezeit

Die Variation zwischen den Erreichbarkeitswerten erhöht sich, wenn die Reisezeit im Vergleich zur Reiseweite einer größeren Streuung unterliegt. Denkbare Einflussgrößen sind u. a. der Parksuchverkehr und die Radfahrzeiten im profilierten Gelände. Eine hohe Variation von

Abbildung 53: Aggregationsfehler im Individualverkehr



Quelle: eigene Darstellung

Erreichbarkeitswerten kann jedoch von einer nicht ausreichenden räumlichen Auflösung geglättet werden.

b) Gleichbleibende Variation von Erreichbarkeitswerten

Denkbar ist außerdem, dass die Streuung zwischen den Erreichbarkeitswerten weitgehend stabil bleibt. Dieses Resultat macht einen linearen Zusammenhang zwischen der Reiseweite und der Reisezeit wahrscheinlich. Gleichzeitig deutet eine gleichbleibende Variation darauf hin, dass die Modellierung der Reisezeit auf zu stark vereinfachten Annahmen beruht und in der Realität auftretende Reisezeitunterschiede nicht korrekt abgebildet werden. In diesem Fall ist die arbeitsintensive Modellierung der Reisezeit nicht sinnvoll.

c) Abnahme der Variation von Erreichbarkeitswerten auf Basis der Reisezeit

Schließlich ist es möglich, dass bestehende Entfernung Unterschiede bei Verwendung der Reisezeit eingeebnet werden. Bezogen auf Abbildung 53 wäre dies beispielsweise der Fall, wenn für beide Strecken eine Fahrtzeit

von einer Minute aufzuwenden wäre. In dieser Situation würde sich der eVarK von 0,49 auf 0,33 reduzieren.⁶⁹ Diese Konstellation würde eine im Vergleich zur Reiseweite reduzierte räumliche Auflösung erlauben.

In Abbildung 54 ist für die Modi des Individualverkehrs exemplarisch dargestellt, wie sich der EWRelVarK im 500-Meter-Raster verändert, wenn die Reisezeit durch die Reiseweite als Widerstandsattribut ersetzt wird. Tabelle 43 zeigt für die höchste und geringste Auflösung außerdem die prozentuale Zunahme der mittleren einfachen und einwohnergewichteten RelVarK für geometrische und einwohnergewichtete Zentroide. Im Fuß- und Radverkehr weisen die resultierenden Erreichbarkeitswerte eine identische Streuung auf. Die Verteilung von Reiseweiten und Reisezeiten ist auf Ebene des bewohnten 100-Meter-Rasters und für alle Gelegenheitstypen also nahezu identisch. Im Fußverkehr ist dieses Ergebnis nicht überraschend, da die Reiseweiten linear in Reisezeiten übersetzt werden. Einzig die Verzögerung an Ampeln in Höhe von 30 Sekunden könnte zu einer geringen zusätzlichen räumlichen Variation von Erreichbarkeitswerten führen (vgl. Abschnitt 3.5.3). Die Reisezeiten im Radverkehr werden zusätzlich von der Topographie beeinflusst. Die Streuung von Erreichbarkeitswerten verändert diese jedoch nicht. Dieser Befund gilt unabhängig vom Vergleichssystem und vom Gelegenheitstyp. Es ist somit von keiner wesentlichen Beeinflussung der Reisezeit im Radverkehr durch das Höhenmodell auszugehen. Zumindest im norddeutschen Flachland sollte ein solches Modell bei der Erreichbarkeitsberechnung entfallen.

Im MIV erhöht sich die räumliche Variation der Erreichbarkeitswerte unter Verwendung der Reiseweite in den 500-Meter-Zellen und Gemeinden (vgl. Abbildung 54). Dabei weisen das hochaufgelöste 500-Meter-Raster sowie die gewichteten EWRelVarK die größten Veränderungen auf (vgl. Tabelle 43). Dieser Umstand deutet darauf hin, dass sich insbesondere in dicht besiedelten Gebieten die räumliche Streuung der Reiseweite durch die Verwendung von Reisezeiten reduziert.

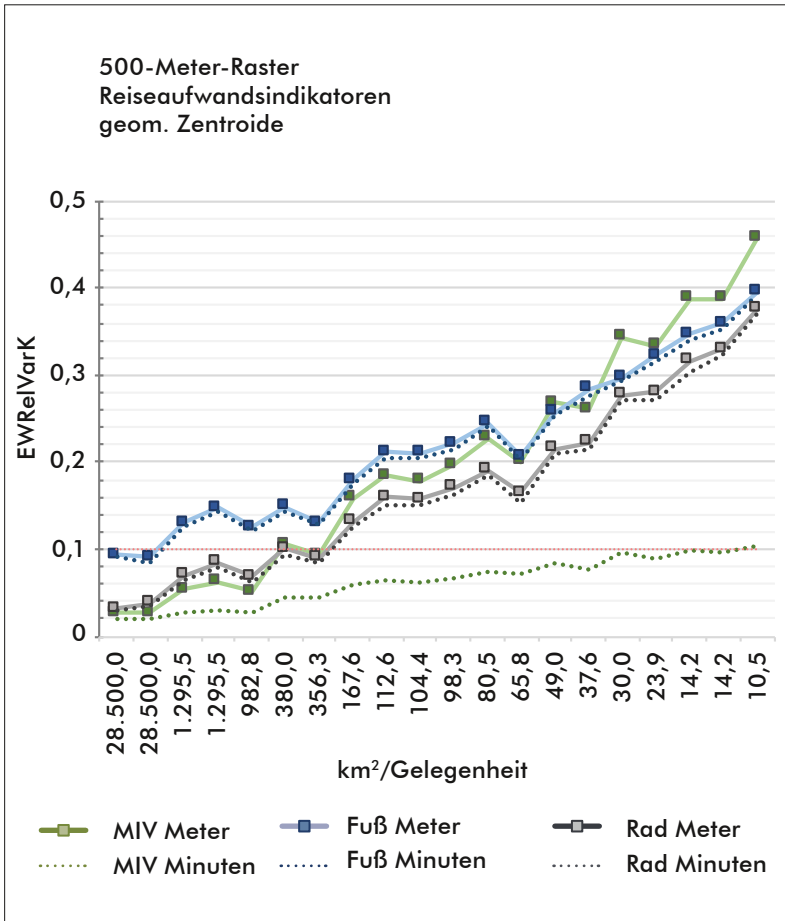
Beispielsweise erhöht sich der EWRelVarK im 500-Meter-Raster und im Gelegenheitstyp Hausarzt (14,2 km²/Gelegenheit) von 9,6% auf

69 Fall 1: {865,5 Meter; 300 Meter} = $\frac{s = 282,75}{\bar{x} = 582,75} = 0,485$;

Fall 2: {2 min; 1 min} = $\frac{s = 0,5}{\bar{x} = 1,5} = 0,3$

Abbildung 54: EWRelVarK im MIV, Fuß- und Radverkehr für die Reisezeit und die Reiseweite

Dargestellt ist der einwohnergewichtete RelVarK in Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung des Vergleichssystems, dem Verkehrsmodus, der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen und dem gewählten Raumwiderstand (Minuten oder Meter). Der Linienvorlauf zeigt die um die Einwohnerzahl in den 500-Meter-Zellen gewichtete mittlere gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten im Verhältnis zur berechneten Reisezeit im 500-Meter-Raster. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert. Die Reiseweite ist kein relevanter Widerstandsparameter des ÖV.



38,8%. Der Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizient für die Reiseweite und die Reisezeit beträgt im 500-Meter-Raster im Mittel über alle Gelegenheitstypen 0,932. Die Ränge der Werteausprägungen variieren zwischen den 500-Meter-Zellen also kaum. Folglich erzeugen vor allem absolute Verschiebungen in allen Raumeinheiten den Anstieg der RelVarK. Dies bedeutet auch, dass die Berechnung der Reiseweite im MIV von einer hohen Auflösung wesentlich stärker profitiert, als die Berechnung der Reisezeit.

Eine Ursache ist die Verwendung von statischen PRZ. Diese führen zu einem räumlich kaum differenzierten Anstieg der Gesamtreisezeit (vgl. Abschnitt 3.5.2). In der Folge bleiben Reisezeitunterschiede zwar bestehen, ihre relative Bedeutung geht aber zurück. Ein völliger Verzicht auf PRZ erzeugt eine im Vergleich zur Reiseweite nahezu identische Streuung der Reisezeit (vgl. Abschnitt 5.3.3). Ein weiterer Einflussfaktor ist der verwendete Widerstandsparameter. Die Raumwiderstände des MIV beziehen sich entweder auf kürzeste oder schnellste Routen. In der Regel wird die Routensuche jedoch nur mit einem Widerstandsparameter zur Verringerung der Rechenzeiten durchgeführt. Gleichwohl führt diese Vereinfachung dazu, dass die Reiseweite nicht immer dem kürzesten und die Reisezeit nicht immer dem schnellsten Weg entspricht. Dies könnte dazu führen, dass die Variation zwischen den Reiseweiten steigt, wenn die Reisezeit als wesentliches Widerstandsattribut verwendet wird. In

Tabelle 43: Veränderung des RelVarK der Reiseweite gegenüber dem RelVarK der Reisezeit

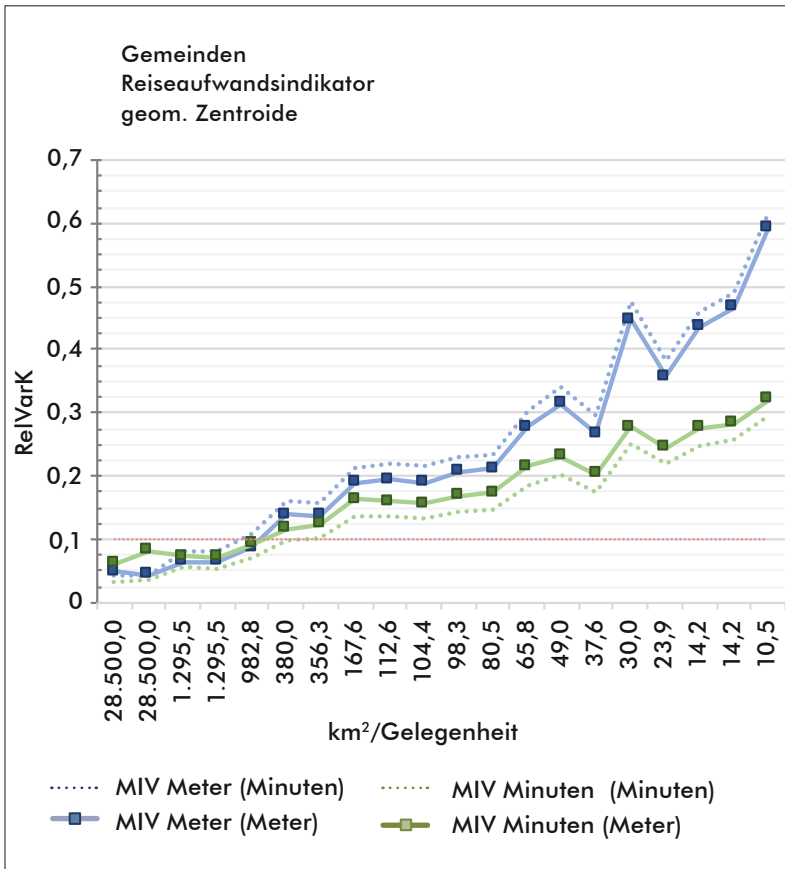
Raumwiderstandsindikatoren über alle Gelegenheitstypen gemittelt; alle Angaben in Prozent; fett: Werte $\geq 100,0$; unterstrichen: Werte $\leq 5,0$

Messwerte	500-Meter-Raster			Gemeinden		
	MIV	Fuß	Rad	MIV	Fuß	Rad
RelVarK(geom.)	123,55	<u>1,47</u>	<u>1,20</u>	67,98	<u>0,15</u>	<u>0,65</u>
RelVarK(gew.)	118,96	<u>1,61</u>	<u>3,28</u>	71,50	<u>0,19</u>	<u>2,01</u>
EWRelVarK(geom.)	220,66	<u>2,25</u>	<u>4,07</u>	127,07	<u>0,42</u>	<u>2,93</u>
EWRelVarK(gew.)	222,34	<u>2,17</u>	<u>4,96</u>	127,35	<u>0,72</u>	<u>2,66</u>

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 55: RelVarK der Reisezeit und Reiseweite in Abhängigkeit vom Widerstandsattribut

Dargestellt ist der RelVarK im MIV in Abhängigkeit von der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen, dem gewählten Raumwiderstand (Minuten oder Meter) und dem verwendeten Widerstandsattribut (Minuten oder Meter). Die Klammer beinhaltet das verwendete Widerstandsattribut. Dieses gibt an, ob die Kurzwegsuche auf Basis der Reisezeit oder der Reiseweite erfolgte. Der ermittelte Raumwiderstand bezieht sich auf diese besten Wege. Beispielsweise kann die Kurzwegsuche für den schnellsten Weg erfolgen, für diesen jedoch die Reiseweite ausgegeben werden. Der Linienvverlauf zeigt die mittlere gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Raumwiderstände im Verhältnis zum berechneten Raumwiderstand im 500-Meter-Raster. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.



einem zweiten Rechendurchlauf wurden die Reiseweite und die Reisezeit für kürzeste Wegen berechnet. Abbildung 55 zeigt eine Annäherung des RelVarK von Reiseweite und Reisezeit bei Nutzung der Distanz als Widerstandsparameter. Dennoch bleiben erhebliche Unterschiede weiterhin bestehen.

Es ist festzuhalten, dass die Verwendung der Reisezeit im MIV, jedenfalls unter den getroffenen Modellannahmen, zu einer Glättung von Erreichbarkeitsunterschieden führt. Entsprechend reduziert sich der Genauigkeitsgewinn bei Verwendung einer sehr hohen Auflösung. Eine Abbildung des MIV mit Hilfe von Reisezeiten erlaubt die Verwendung einer im Vergleich zur Reiseweite geringeren räumlichen Auflösung. Folglich resultiert die in Abschnitt 5.2 ermittelte geringe Variation der Erreichbarkeitswerte im MIV ausschließlich aus der Wahl des Widerstandsattributes. Eine ausschließlich geometrische angelegte Erreichbarkeitsberechnung zeigt im Individualverkehr für alle Verkehrsmodi einen vergleichbaren Nutzen einer hohen Auflösung.

Klassifizierung und Rundung von Erreichbarkeitswerten

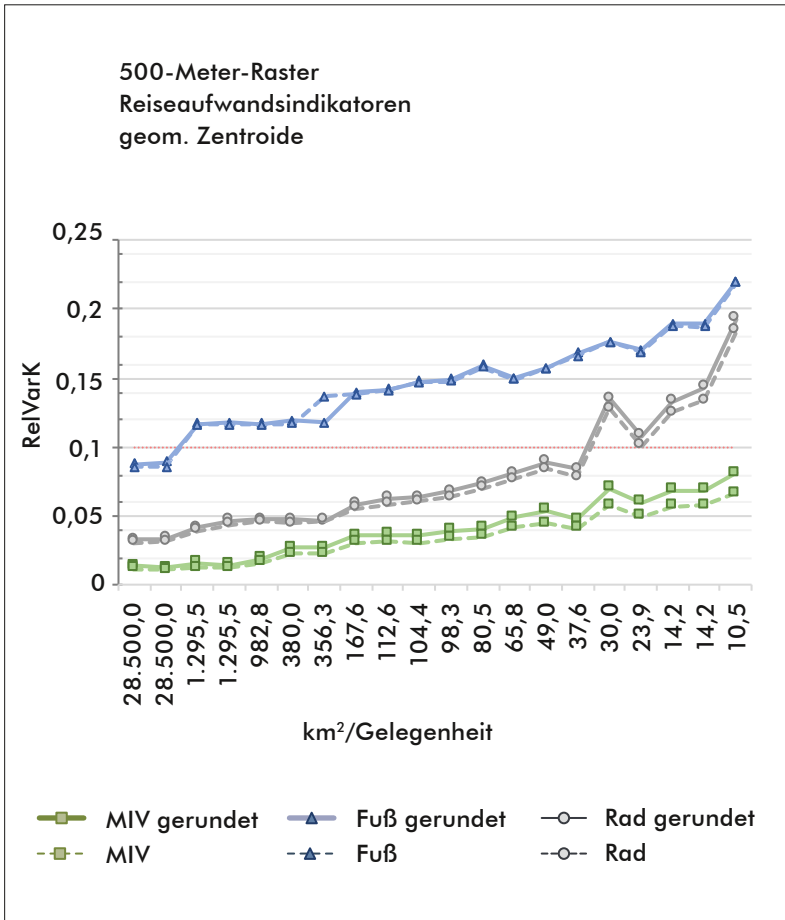
Die bisherigen Analysen unterstellen eine Weiterverwendung von Erreichbarkeitswerten als Dezimalzahlen. Die klassischen Anwendungen sind jedoch Kartenwerke und Erreichbarkeitsdiagramme (vgl. Abschnitt 1.2.3). Bei diesen hängt der Einfluss der Raumauflösung von der Kategorisierung der Erreichbarkeitswerte ab. Es ist denkbar, dass die Verwendung von Kategorien zu einer deutlichen Glättung von Erreichbarkeitswerten führt und den Nutzen einer hohen Auflösung deutlich mindert. Ein identischer Effekt wenngleich in einem geringeren Ausmaß ist auch bei der Rundung von Erreichbarkeitswerten zu erwarten.

Nachfolgend wird untersucht, inwiefern der Umgang mit Erreichbarkeitswerten und der intendierte Anwendungsfall den Nutzen der räumlichen Auflösung beeinflussen. Immer wieder kommen ganzzahlige Erreichbarkeitswerte zum Einsatz, da sich im Vergleich zu Dezimalzahlen der Speicherbedarf mitunter um den Faktor vier reduziert.⁷⁰ Weiterhin ist davon auszugehen, dass Ganzzahlen leichter zu lesen, zu

70 Unter Annahme eines 8-Bit-Integers (Ganzzahl) im Vergleich zu einem 32-Bit-Float (Dezimalzahl). Je nach Anwendungsfall (z. B. Reisezeit oder Erreichbarkeitspotenzial) und Anzahl der Dezimalstellen können die Unterschiede auch geringer ausfallen.

Abbildung 56: Veränderung von RelVarK nach der Rundung von Erreichbarkeitswerten

Dargestellt ist der RelVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus, der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen und der optionalen Rundung der Reisezeiten. Im Normalfall werden die Reisezeiten als Dezimalzahl berücksichtigt. Mit der Rundung werden Ganzzahlen erzeugt. Der Linienvverlauf zeigt die mittlere gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten im Verhältnis zur berechneten Reisezeit im 500-Meter-Raster für geometrische Zentroide. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert. Im ÖV werden Reisezeiten immer ganzzahlig ermittelt.



interpretieren und darzustellen sind. Auch die Weiterverarbeitung von Erreichbarkeitswerten durch Praxisanwender wird vereinfacht. Aus diesen Gründen stellen das Erreichbarkeitsportal der MRH und der DVAN ausschließlich ganzzahlige Erreichbarkeitswerte bereit (MRH o.J.a; Matthes et al. 2019).

In Abbildung 56 ist für den Individualverkehr die Veränderung von RelVarK dargestellt, nachdem die Reisezeiten in Ganzzahlen überführt wurden. Lediglich im MIV und im Radverkehr sind erkennbare Anstiege des RelVarK festzustellen. Dies bedeutet, dass sich die räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten nach Rundung der Reisezeiten sogar etwas erhöht. Folglich werden Erreichbarkeitsunterschiede nicht eingeebnet, sondern zusätzlich erzeugt. Die Fahrtzeiten des ÖV werden ausschließlich ganzzahlig ausgegeben. Die prozentualen Veränderungen der RelVarK nach Rundung der Erreichbarkeitswerte zeigen deutliche Abhängigkeiten von der räumlichen Auflösung und dem Verkehrsmodi (vgl. Tabelle 44).

Tabelle 44: Veränderung des RelVarK nach der Rundung von Erreichbarkeitswerten

Raumwiderstandsindikatoren über alle Gelegenheitstypen gemittelt alle Angaben in Prozent; die Fahrtzeiten im ÖV werden immer ganzzahlig ausgegeben

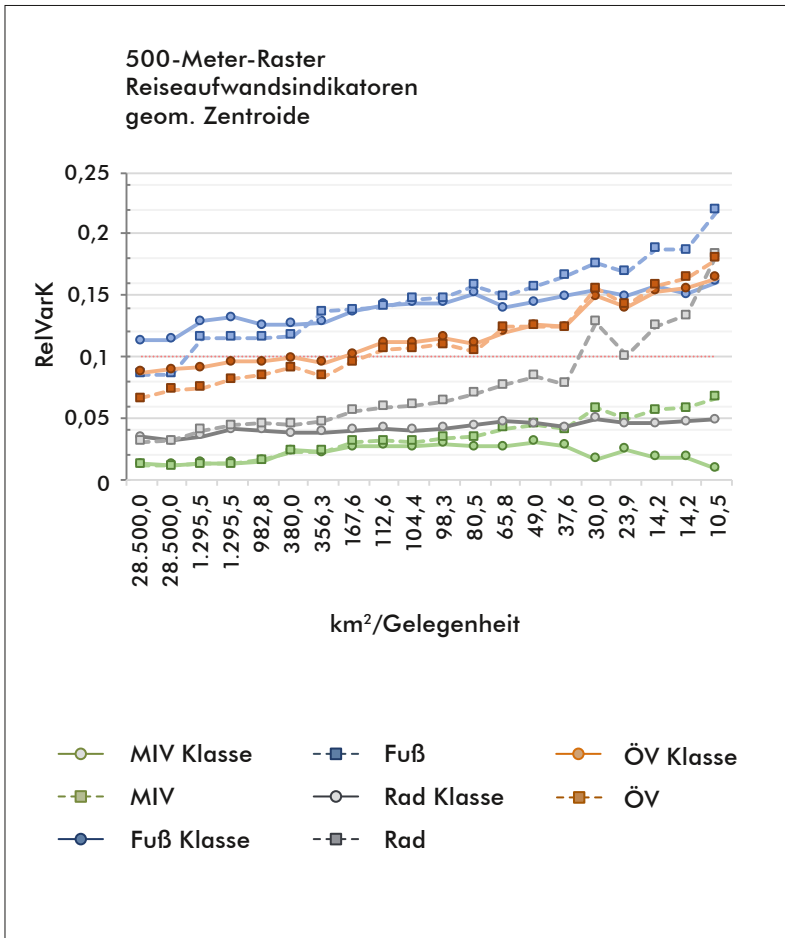
	500-Meter	1-Kilometer	5-Kilometer	Gemeinden
MIV	18,6	12,1	1,8	3,4
Fuß	-0,1	0,1	0,0	0,0
Rad	5,7	1,9	0,2	0,3

Quelle: eigene
Darstellung

So erhöht sich die mittlere Abweichung der MIV-Reisezeiten von der MRE im 500-Meter-Raster um 18,6%. Im 1-Kilometer-Raster liegt dieser Wert bei 12,1% und in Gemeinden bei 3,4%. Im Fußverkehr mit seinen wesentlich längeren mittleren Reisezeiten ergibt sich im 500-Meter-Raster ein Rückgang um 0,1%. Die Analyse der einfachen und einwohnergewichteten VarK zeigt nahezu identische Ergebnisse (nicht dargestellt). Die Variation von Erreichbarkeitswerten nimmt im MIV also gerade auf kurzen Wegen und in kleinen Raumeinheiten deutlich zu. Der NMIV ist

Abbildung 57: Veränderung von RelVarK nach Klassifizierung der Erreichbarkeitswerte

Dargestellt ist der RelVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus, der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen und der optionalen Klassifizierung der Reisezeiten. Mit der Klassifizierung werden die Erreichbarkeitswerte in sechs Klassen mit einer Spannweite von jeweils 10 Minuten eingeteilt. Der Linienverlauf zeigt die mittlere gewichtete Abweichung der Klassenzugehörigkeiten der Erreichbarkeitswerte im bewohnten 100-Meter-Raster im Verhältnis zur Klassenzugehörigkeit der Erreichbarkeitswerte im 500-Meter-Raster. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.



von der Rundung der Reisezeiten hingegen nicht betroffen. Das Runden der Werte führt bei kurzen Reisezeiten zur Bildung relevanter Erreichbarkeits sprünge. Entsprechend reduziert sich die Genauigkeit der berechneten Erreichbarkeitswerte.

Bei der Darstellung von Erreichbarkeitswerten in Karten oder Diagrammen hängen die sichtbaren räumlichen Unterschiede von der verwendeten Klassifizierung ab. Es ist davon auszugehen, dass die Verwendung einer Klassifizierung zu einer deutlichen Glättung der sichtbaren Erreichbarkeitsunterschiede führt. Um diesen Fall zu testen, wurden alle Reisezeiten (t) wie folgt klassifiziert: $\{0 \leq t < 10: 10; 10 \leq t < 20: 20; 20 \leq t < 30: 30; 30 \leq t < 40: 40; 40 \leq t < 50: 50; 50 \leq t < 60: 60\}$. Auf Basis dieser Werte wurde anschließend eine Neuberechnung aller VarK vorgenommen.

Im Unterschied zur Rundung von Erreichbarkeitswerten ist ein deutlicher Einfluss der Klassifizierung auf die räumliche Variation dieser Werte zu erkennen. Die geringen RelVarK zeigen, dass die im 100-Meter-Raster und Vergleichssystem ermittelten Erreichbarkeitswerte zumeist der gleichen Klasse zugeordnet werden. Folglich sind die MRE und der im Vergleichssystem ermittelte Wert häufig nahezu identisch. Im Individualverkehr und insbesondere im Radverkehr verringert sich die Abhängigkeit der räumlichen Variation vom Gelegenheitstyp erheblich (vgl. Abbildung 57 und Tabelle 45). Beispielsweise liegt im 500-Meter-Raster die mittlere Abweichung der klassifizierten Reisezeit zur nächsten Einrichtungen mit dem Fahrrad von der MRE 44,0% unterhalb der unklassifizierten Reisezeit. In allen Verkehrsmodi ist eine stärkere Glättung der RelVarK bei einer Gewichtung um die Einwohnerzahl zu verzeichnen. Die Repräsentativität der klassifizierten Erreichbarkeiten ist gegenüber der Bevölkerung im Vergleich zur bewohnten Fläche also geringer.

Vor allem auf kurzen Distanzen verursacht die Klassifizierung eine Glättung der Erreichbarkeitsunterschiede (vgl. Karte 18). Dies ist auch der Entfernungsbereich mit einer besonders starken Streuung der Reisezeiten im Verhältnis zu ihrem Mittelwert (vgl. Abschnitt 5.2.1). Erreichbarkeitsunterschiede im Bereich zwischen null und zehn Minuten werden in eine einheitliche Kategorie überführt. Gleichzeitig sinkt der RelVarK auf 0,0%. In einzelnen Gebieten in großer Entfernung zur nächsten Gelegenheit ist hingegen eine Zunahme des RelVarK zu

beobachten (vgl. Karte 18). Dieser Effekt resultiert aus der Zuordnung weniger Erreichbarkeitswerte in unterschiedliche Klassen.

Tabelle 45: Veränderung des RelVarK nach der Klassifizierung von Erreichbarkeitswerten

Raumwiderstandsindikatoren über alle Gelegenheitstypen gemittelt; alle Angaben in Prozent; fett: Werte $\leq -30,0$; unterstrichen: Werte $\leq -10,0$; EW = Gewichtung um die Einwohnerzahl im Vergleichssystem (RelVarK)

	500-Meter	1-Kilometer	5-Kilometer	Gemeinden
MIV	-38,6	-33,1	<u>-18,0</u>	<u>-19,8</u>
MIV (EW)	-48,1	-44,3	<u>-22,6</u>	<u>-24,4</u>
Fuß	-4,5	-7,8	<u>-14,0</u>	<u>-12,1</u>
Fuß (EW)	<u>-13,9</u>	<u>-14,2</u>	<u>-16,8</u>	<u>-14,7</u>
Rad	-44,0	-31,4	<u>-24,1</u>	<u>-20,0</u>
Rad (EW)	-75,5	-68,8	-42,1	-32,2
ÖV	-2,9	-1,1	<u>-9,4</u>	<u>-5,9</u>
ÖV (EW)	0,5	-0,8	-11,2	-11,9

Quelle: eigene Darstellung

Es ist also zu bedenken, dass die Klassifizierung von Erreichbarkeitswerten im Individualverkehr zumeist eine Glättung der räumlichen Variation bewirkt, in geringem Umfang aber auch neue, eigentlich nicht vorhandene Erreichbarkeitsunterschiede produziert. Lediglich im ÖV ist kein nennenswerter Rückgang der Reisezeitvariation festzustellen. Zudem weist auch der Fußverkehr eine im Vergleich zum MIV und Radverkehr nur mäßige Verringerung der mittleren Abweichungen auf. Da im ÖV und im Fußverkehr die höchsten mittleren Reisezeiten zu verzeichnen sind, nimmt die Belegung der einzelnen Erreichbarkeitsklassen deutlich zu. So befinden sich im Gelegenheitstyp *Hausarzt* alle Reisezeiten des MIV in den Klassen von 0 bis 10 sowie von 11 bis 20 Minuten (vgl. Tabelle 46). Im Fußverkehr und im ÖV ist die Belegung der Klassen hingegen deutlich gleichmäßiger.

Bei einer Klassifizierung der Erreichbarkeitswerte ist es möglich, Reisezeiten des MIV und des Radverkehrs mit einer hohen relativen Genauigkeit im 500-Meter-Raster zu berechnen. Im MIV können klassifizierte Erreichbarkeitswerte mit einem RelVarK unterhalb von 0,1 zudem im 1-Kilometer-Raster oder auf Ebene statistischer Gebiete berechnet werden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Klassendarstellung als repräsentativ für die tatsächlichen Erreichbarkeitsverhältnisse anzusehen ist. Im öffentlichen Verkehr ist lediglich auf Gemeindeebene und im 5-Kilometer-Raster eine geringe Abnahme der Variation zu beobachten (vgl. Tabelle 45). Dies bedeutet auch, dass die Klassifizierung von Erreichbarkeitswerten im ÖV in der Regel nicht zu einer weitgehenden Glättung der vorhandenen Erreichbarkeitsunterschiede führt. Zu bedenken ist auch, dass die vorgestellten Ergebnisse wesentlich von der verwendeten Klassifizierung abhängen. Größere (und weniger) Klassen würden die Glättung eher verstärken und die räumliche Variation weiter reduzieren. Kleinere und damit zusätzliche Klassen würden indes das Gegenteil bewirken.

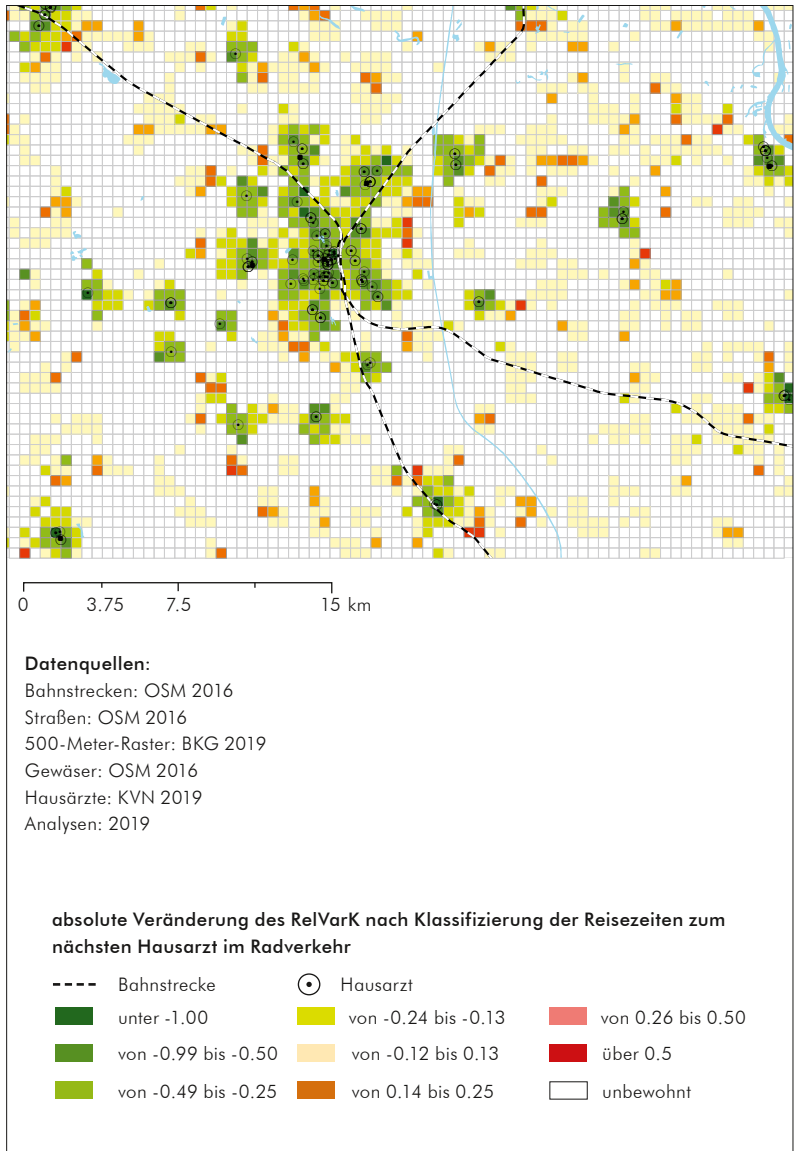
Tabelle 46: Ladung der Erreichbarkeitsklassen im Gelegenheitstyp Hausarzt im 500-Meter-Raster

Die unterschiedlichen Summen resultieren aus den unterschiedlichen Maximaldistanzen.

Klasse	MIV	Fuß	Rad	ÖV
0 – 10	35.224	3.195	14.999	2.950
11 – 20	4.240	5.209	13.440	8.152
21 – 30	0	4.394	8.625	10.856
31 – 40	0	3.878	2.787	6.394
41 – 50	0	3.903	715	1.657
51 – 60	0	3.663	109	450
Σ	39.464	24.242	40.675	30.459

Quelle: eigene Darstellung

Karte 18: Veränderung des RelVarK nach Klassifizierung der Reisezeit zum nächsten Hausarzt im Radverkehr



Quelle: eigene Darstellung

Schlussfolgerungen

Im NMIV erzeugen die Widerstandsberechnung auf Basis der Reiseweite und der Reisezeit eine nahezu identische Variation von Erreichbarkeitswerten. Dieser Befund deutet auf einen linearen Zusammenhang dieser Widerstandsparameter hin. Da die Modellierung der Reisezeit einen hohen Arbeitsaufwand erzeugt, ist ihre Implementierung kritisch zu hinterfragen. Im MIV führt die Verwendung der Reisezeit zu einer Glättung der geometrisch angelegten Raumwiderstände. Diese Glättung resultiert insbesondere aus der Verwendung vereinfachter Annahmen hinsichtlich der PRZ. Werden im Individualverkehr jedoch ausschließlich Reiseweiten abgebildet, ist die einheitliche Verwendung eines 100-Meter-Rasters sinnvoll.

Gerade in wissenschaftlichen Untersuchungen ist der Umgang mit genauen Erreichbarkeitswerten in Form von Dezimalzahlen üblich. Viele Praxisanwendungen beruhen jedoch auf gerundeten oder klassifizierten Erreichbarkeitswerten. Die durchgeführten Analysen zeigen, dass das Runden der Reisezeiten insbesondere im MIV und hier im 500-Meter-Raster eine wesentliche Steigerung der räumlichen Variation erzeugt. Es werden relative Erreichbarkeitsunterschiede produziert, die die Realbedingungen deutlich überzeichnen. Gleichzeitig sind diese so gering, dass sie weder die Wahl des Raumbezugssystems beeinflussen sollten noch ein grundsätzliches zu vermeidendes Verfahren darstellen. In den übrigen Verkehrsmodi und Raumbezugssystemen sind keine wesentlichen Veränderungen zu erkennen.

Klassifizierte Erreichbarkeitswerte werden insbesondere in kartographischen Darstellungen verwendet. Dabei ist ohnehin fraglich, welche räumliche Detaillierung auf gedruckten Karten überhaupt zu erkennen ist. Dieser Einwand entfällt bei der Verwendung von interaktiven und webbasierten Anwendungen (Madelin et al. 2009, S. 658). Gerade im Individualverkehr ist eine deutliche Glättung von Erreichbarkeitswerten bei einer gleichzeitigen Minderung der räumlichen Variation zu konstatieren. Dies bedeutet auch, dass eine Reduzierung der Auflösung zumindest im MIV und Radverkehr nur zu geringen Genauigkeitsverlusten führt. Auch im Fußverkehr ist eine deutliche Reduktion der Variation festzustellen. Sollen im bewohnten 100-Meter-Raster berechnete Erreichbarkeitswerte lediglich aggregiert werden, ist auch die

Verwendung eines 1-Kilometer-Rasters in allen Verkehrsmodi denkbar. Im ÖV ist hingegen keine wesentliche Veränderung der mittleren räumlichen Variation nach der Klassifizierung der Reisezeiten zu erkennen. Gleichwohl ist zu betonen, dass sich die räumliche Verteilung der darstellbaren Erreichbarkeitsverhältnisse verändert und es insofern zu einer Verschiebung der relativen Erreichbarkeiten kommt.

5.3.5 Einordnung der Ergebnisse

Die Analysen zeigen eine hohe Abhängigkeit der Variation von Erreichbarkeitswerten von der Detaillierung der Verkehrsgraphen. Anders als zu Beginn der Auswertungen vermutet, führt eine geringere Detaillierung nicht zur Glättung räumlicher Erreichbarkeitsunterschiede. Vielmehr werden in einem erheblichen Umfang zusätzliche Erreichbarkeitsunterschiede erzeugt. Dies betrifft die vereinfachte Anbindung der Haltestellen, den Verzicht auf PRZ und die Berechnung von NMIV-Erreichbarkeiten über Luftlinien. Diese Vereinfachungen können auf kleinräumiger Ebene erhebliche Erreichbarkeits sprünge produzieren, die von den Realbedingungen erheblich abweichen. Eine Reduzierung der Auflösung führt zu einer Verallgemeinerung ungenauer Erreichbarkeitswerte für immer größere Gebietseinheiten.

Alle Analysen zeigen, dass bei einer deutlich vereinfachten Modellierung der Verkehrsgraphen eine möglichst hohe räumliche Auflösung zu verwenden ist, um die Repräsentativität der Erreichbarkeitswerte gegenüber der Bevölkerung zu erhalten und ausgeprägte Aggregationsfehler zu vermeiden. Im Gegensatz dazu ist es in Einzelfällen möglich, die räumliche Auflösung bei der Verwendung sehr detaillierter Verkehrsgraphen zu reduzieren. Eine gewisse Ausnahme bildet hier die Vereinfachung der Haltestellenanbindung im ÖV-Verkehrsgraphen (vgl. Abschnitt 5.3.1). Zwar erzeugt auch hier die Anbindung über Luftlinien eine zusätzliche räumliche Variation, gleichwohl ist diese in Relation zur Gesamtreisezeit vergleichbar gering. Da die fußläufige Anbindung einen prinzipiell intermodalen Verkehrsgraphen erfordert, könnte der Verzicht auf diesen Modellteil und die damit einhergehende Steigerung der Nutzbarkeit den Verzicht auf eine fußläufige Anbindung rechtfertigen.

Die abnehmende Genauigkeit der Erreichbarkeitsberechnung bei einer Vereinfachung der Netzmodelle ist eine unmittelbare Folge des Zentroidproblems. Da auf kleinräumiger Ebene eine reduzierte Genauigkeit der Erreichbarkeitsberechnung festzustellen ist, verstärkt sich dieser Effekt bei einer weiteren räumlichen Aggregation. Die Analysen zeigen auch, dass selbst die Verwendung einwohnergewichteter Zentroide nicht dazu führt, dass sich die Ungenauigkeiten wesentlich reduzieren.

5.4 Erreichbarkeitsindikatoren und Gelegenheitstypen

Die vergangenen Abschnitte haben bereits einen Einfluss der Dichte von Gelegenheiten und der genutzten Erreichbarkeitsindikatoren auf die räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten gezeigt. In diesem Abschnitt wird näher untersucht, ob und warum die Wahl des räumlichen Bezugssystems von den berücksichtigten Gelegenheitstypen und Erreichbarkeitsindikatoren abhängen sollte.

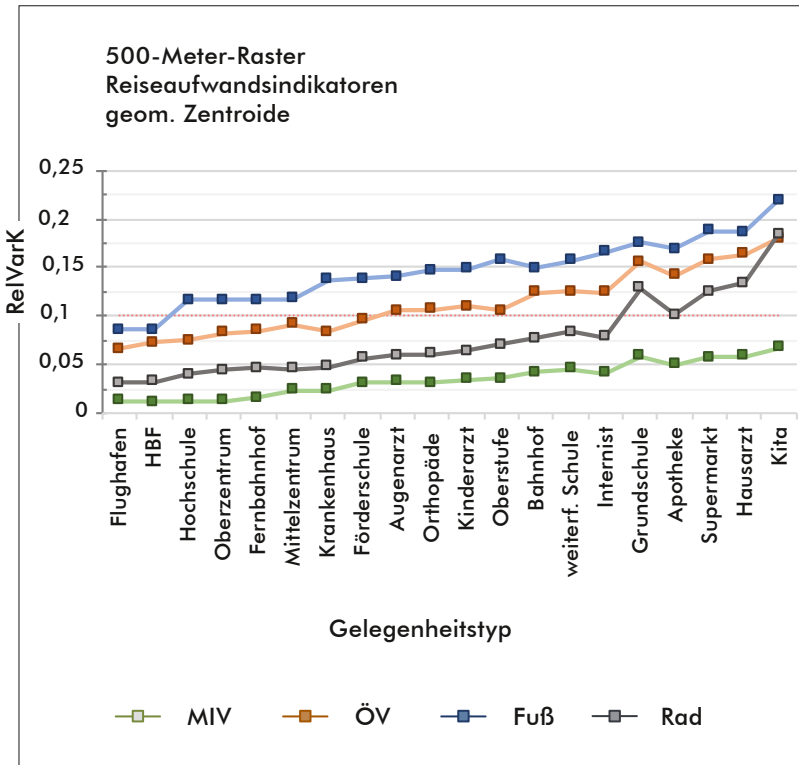
Gelegenheitstypen

Die in Abschnitt 5.2 vorgestellten Analysen unterstreichen die hohe Abhängigkeit zwischen der Einrichtungsdichte in den Gelegenheitstypen und der räumlichen Variation von Erreichbarkeitswerten. Von einer hohen räumlichen Auflösung profitieren Gelegenheitstypen mit einer hohen Dichte in der MRH. Zu diesen gehören mit Hausärzten, Supermärkten, Apotheken, Kitas und Grundschulen insbesondere Einrichtungen der Grundversorgung. Dieser Befund ist von der Wahl des Widerstandsattributes und der Detaillierung der Verkehrsgraphen unabhängig (vgl. Abschnitt 5.3). Lediglich im MIV und im Radverkehr erzeugt die Klassifizierung von Erreichbarkeitswerten eine von der Einrichtungsdichte unbeeinflusste räumliche Variation (vgl. Abbildung 57). Abbildung 58 zeigt exemplarisch alle bei der Berechnung des RelVarK berücksichtigten Gelegenheitstypen.

Um die Bedeutung der Einrichtungsdichte einzuschätzen wird zuerst ermittelt, wie viele unterschiedliche Einrichtungen überhaupt das Ziel schnellster Wege sind. Es ist naheliegend, dass nicht alle im Modell enthaltenen Standorte von zumindest einer Rasterzelle reisezeitminimierend

Abbildung 58: RelVarK in Abhängigkeit vom Gelegenheitstyp

Dargestellt ist der RelVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus und der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen (angegeben ist der Name des jeweiligen Gelegenheitstyps). Der Linienvorlauf zeigt die mittlere gewichtete Abweichung der im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Reisezeiten im Verhältnis zur berechneten Reisezeit im 500-Meter-Raster. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.



zu erreichen sind. Beispielsweise sind von 3.346 im Modell enthaltenen Hausärzten zumindest 2.012 Standorte oder 60,13% von einer bewohnten 100-Meter-Zelle reisezeitminimierend zu erreichen (vgl. Tabelle 47). Dies bedeutet aber auch, dass 1.334 Standorte kein Ziel schnellster Wege sind. Insgesamt 307 Hausärzte liegen außerhalb der MRH und sind auf schnellsten Wegen zumeist nicht erreichbar. Gleichzeitig sind im Modell 1.246 Standorte mit einem sich überlagernden Netzbezug vorhanden⁷¹. Ähnlich niedrige Werte sind u. a. in den Gelegenheitstypen *Apotheke* (72,89%), *Supermarkt* (70,21%), *Mittelzentrum* (56,82%) und bei allen Fachärzten (51,67% bis 70,56%) zu beobachten.

Tabelle 47: Dichte und Erreichbarkeit der einzelnen Gelegenheitstypen
Gesamtfläche der MRH rund 28.500 km²; erreicht = Menge der Gelegenheiten, die auf mindestens einem schnellsten Weg erreicht werden; Σ MRH = Anzahl der Gelegenheiten in der MRH

Gelegenheitstyp	Σ MRH	Σ Modell	Σ erreicht	km ² /Gelegenheit	erreichte in %
Flughafen	1	1	1	28.500,00	100,00%
HBF Hamburg	1	1	1	28.500,00	100,00%
Hochschule	17	23	22	1.295,45	95,65%
Oberzentrum	15	27	22	1.295,45	81,48%
Fernbahnhof	22	55	29	982,76	52,73%
Mittelzentrum	58	132	75	380,00	56,82%
Krankenhaus	61	102	80	356,25	78,43%
Förderschule	178	178	170	167,65	95,51%
Augenarzt	349	385	253	112,65	65,71%
Orthopäde	403	425	273	104,40	64,24%
Kinderarzt	373	411	290	98,28	70,56%
Oberstufe	366	366	354	80,51	96,72%
Bahnhof	404	676	433	65,82	64,05%
weiterf. Schule	612	612	582	48,97	95,10%
Internist	1.340	1.467	758	37,60	51,67%
Grundschule	969	969	951	29,97	98,14%
Apotheke	1.199	1.634	1.191	23,93	72,89%
Supermarkt	2.060	2.860	2.008	14,19	70,21%
Hausarzt	3.039	3.346	2.012	14,17	60,13%
Kita	2.904	2.904	2.712	10,51	93,39%

Quelle: eigene Darstellung

71 Dieser Effekt tritt beispielsweise bei Ärztehäusern auf. Diese können zwar mehrere Hausärzte enthalten, der Netzbezug ist aber jeweils identisch.

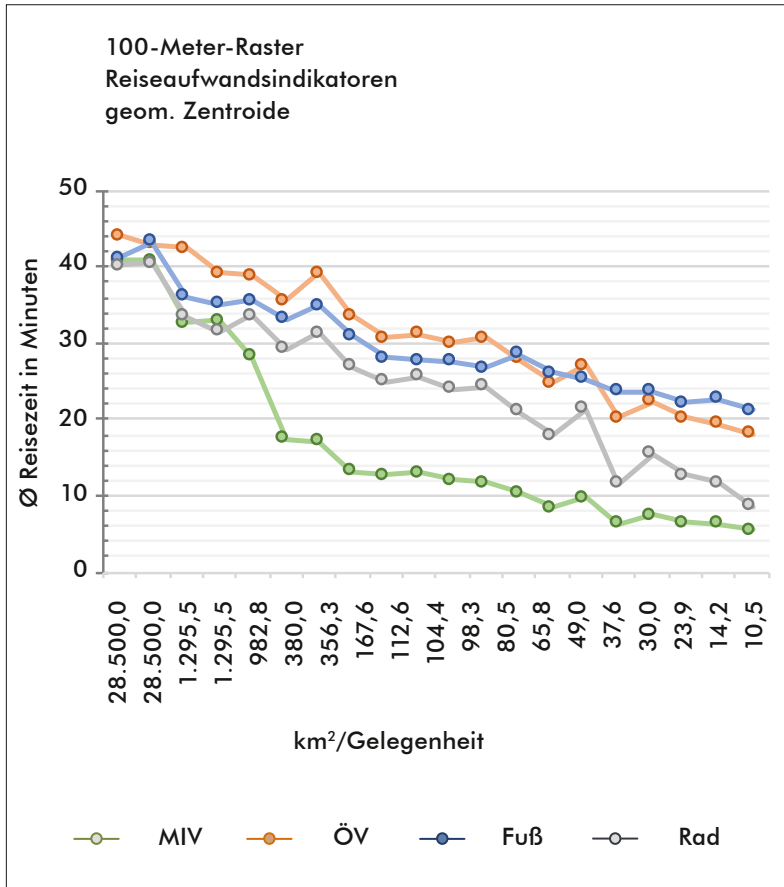
Wenn mehrere Standorte dem gleichen Netzelement zugeordnet sind, ist der Raumwiderstand zu diesen identisch und nur eine Gelegenheit wird als Zielgröße ausgegeben. Daher beeinflusst nicht nur die Einrichtungsdichte die räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten. Gerade bei Ärzten wird die Streuung der Erreichbarkeiten aufgrund zahlreicher Gemeinschaftspraxen eher überschätzt. Zudem sind einzelnen Gelegenheitstypen auch Einrichtungen außerhalb des festgelegten 20-Kilometer-Puffers erhoben worden, um allen Gebieten innerhalb der MRH in jedem Falle eine nächste Einrichtung zuzuordnen (Zentren, Bahnhöfe und Hochschulen). Hier resultiert die Differenz zwischen vorhandenen und nächstgelegenen Einrichtungen also aus den Modellannahmen.

Die Analysen geben allein noch keinen Aufschluss darüber, inwiefern der Gelegenheitstyp die räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten beeinflusst. Es ist naheliegend, dass die durchschnittliche Reisezeit zur nächsten Einrichtung einen starken Einfluss auf die relative Variation der Erreichbarkeitswerte ausübt. In einer 500-Meter-Zelle beträgt der maximale Lagefehler zwischen den Zentroiden von zwei bewohnten 100-Meter-Zellen 565,7 Meter (vgl. Abbildung 53). Auf dem Fußwegenetz kann sich dieser Wert noch weiter erhöhen. Die rund 570 Meter Differenz erzeugen bei einer Geschwindigkeit von 4,0 km/h im Fußverkehr einen zusätzlichen Zeitaufwand von 8,5 Minuten. Zum nächsten Hausarzt beträgt die mittlere Gehzeit im bewohnten 100-Meter-Raster 22,6 Minuten, der Lagefehler hat an dieser einen maximalen Anteil von 37,6%. Im Radverkehr liegt der zusätzliche Zeitaufwand bei 2,41 Minuten und die durchschnittliche Fahrtzeit zum nächsten Hausarzt bei 11,7 Minuten. Entsprechend reduziert sich der lagefehlerbedingte Anteil auf 20,6%. Im MIV reduziert sich dieser Fehler auf 14,2%.

Die Berechnungen zeigen eine deutliche Abhängigkeit der mittleren Reisezeit zur nächsten Einrichtung von der Einrichtungsdichte (vgl. Abbildung 59). Dies bedeutet auch, dass die Lagefehler in Relation zur mittleren Reisezeit stetig an Bedeutung gewinnen. Obwohl im MIV die geringsten Reisezeiten zu verzeichnen sind, führt das Fehlen differenzierter PRZ zu vergleichsweise geringen Verzerrungen (vgl. Abbildung 58).

Eine weitere Besonderheit ist die im Gelegenheitstyp Grundschule (30,0 km²/Gelegenheit) auffallend hohe räumliche Variation der Erreichbarkeitswerte (vgl. Abbildung 55 und Abbildung 58). Es ist zu

Abbildung 59: Durchschnittliche Reisezeit zur nächsten Gelegenheit
 Angegeben ist jeweils die mittlere durchschnittliche Reisezeit auf Ebene des bewohnten 100-Meter-Rasters zur nächsten Einrichtung eines Gelegenheitstyps in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus und der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen.



vermuten, dass die sehr disperse Verteilung der Standorte gerade im Radverkehr und im ÖV zu vergleichsweise zahlreichen Relationen mit eher geringen Reisezeiten führt. Entsprechend steigt die Variation der Erreichbarkeitswerte.

Erreichbarkeitsindikatoren

Die bisher durchgeführten Analysen widmeten sich der Frage, inwiefern die Genauigkeit von Reiseaufwandsindikatoren durch die räumliche Auflösung beeinflusst wird. Mit diesen Indikatoren wird in dieser Arbeit der Reiseaufwand zu nächsten Gelegenheiten berechnet (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Wie die Ergebnisse der zweiten Forschungsfrage und weiterer Studien zeigen, ist ihre Verwendung in der Praxis etabliert (vgl. Abschnitt 4.3). Gleichwohl kommen in der Praxis und der Wissenschaft mit Kumulations- und Potenzialindikatoren weitere komplexe Erreichbarkeitsindikatoren zum Einsatz (Boisjoly & El-Geneidy 2017b, S. 40) (vgl. Abschnitt 1.3.3). Da diese einen besonders hohen Rechenaufwand erzeugen, ist bei ihrer Berechnung die Verwendung einer möglichst niedrigen Auflösung naheliegend.

Aufgrund der sehr langen Rechenzeiten bei Berücksichtigung der etwa 600 Tsd. Standorte, wurden die Arbeitsplätze, Freizeiteinrichtungen, Läden und Wohnstandorte in ein 500-Meter-Raster mit einwohnergewichteten Zentroiden übertragen (vgl. Abschnitt 3.4.2). Dieses Raster enthält 64.094 500-Meter-Zellen mit mindestens einer Gelegenheit. Tabelle 48 zeigt die Standorte und die Anzahl der belegten 500-Meter-Zellen in Abhängigkeit vom Gelegenheitstyp. In den 500-Meter-Zellen können auch Gelegenheiten aus unterschiedlichen Kategorien vorhanden sein.

Tabelle 48: Aggregation von Standorten in ein 500-Meter-Raster

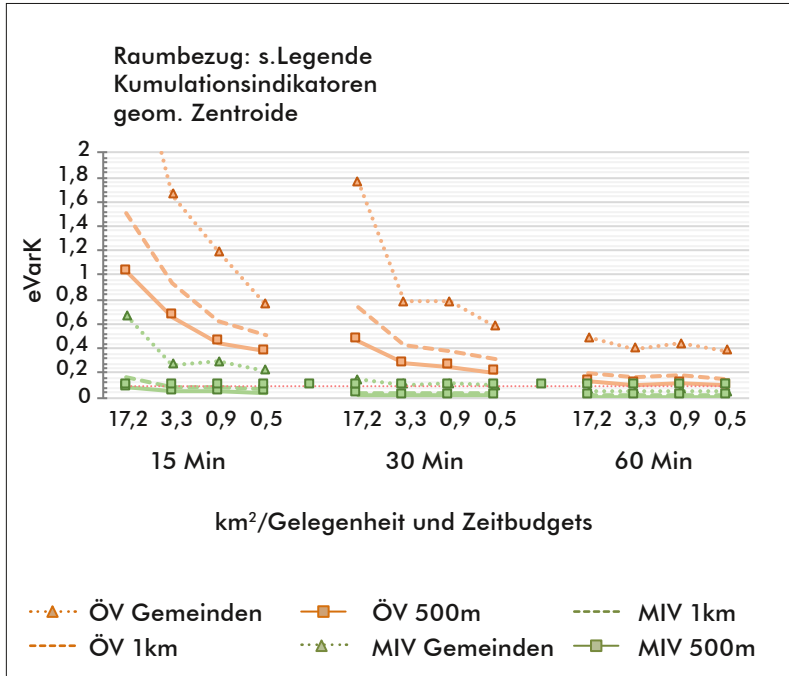
Dargestellt ist die Anzahl der mit Einrichtungen der einzelnen Gelegenheitstypen belegten 500-Meter-Zellen. Beispielsweise wurden die 96.247 Standorte von Arbeitsplätzen in 30.102 500-Meter-Zellen aggregiert.

Gelegenheitstyp	Standorte	500-Meter-Zellen
Arbeitsplätze	96.247	30.102
Läden (aperiodischer Bedarf)	6.387	1.659
Freizeitgelegenheiten	21.048	8.705
Einwohner (Besuche)	425.359	58.071

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 60: eVarK für Kumulationsindikatoren im ÖV und MIV

Dargestellt ist der eVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus (ÖV und MIV), der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen und des verwendeten Zeitbudgets (in Minuten). Der Linienvorlauf zeigt die durchschnittliche gewichtete Abweichung der unter Einhaltung des Zeitbudgets erreichbaren Gelegenheiten im 100-Meter-Raster im Verhältnis zu den erreichbaren Gelegenheiten im 500-Meter-Raster. Der einfache VarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert. Der maximale eVarK des ÖV bei einem Zeitbudget von 15 Minuten beträgt 3,143.



Quelle: eigene Darstellung

Bei der Berechnung von Kumulationsindikatoren ist eine hohe Abhängigkeit des eVarK von der räumlichen Auflösung, der Einrichtungsdichte und der Größe des Zeitbudgets festzustellen (vgl. Abbildung 60). Die mit öffentlichen Verkehrsmitteln innerhalb von 15 Minuten erreichbaren Arbeitsplätze (0,9 km²/Gelegenheit) variieren innerhalb von Gemeinden im Referenzsystem um 0,485, weichen im gewichteten Mittel also um 48,5% vom gemeinsamen Durchschnitt ab. Mit Hilfe der Gemeindezentroide können Kumulationsindikatoren für ein Zeitbudget von 15 Minuten im ÖV somit nicht zuverlässig berechnet werden. Hingegen ist im MIV eine zuverlässige Analyse (eVarK ≤ 0,1) im 500-Meter-Raster und im 1-Kilometer-Raster für alle Gelegenheitstypen und Zeitbudgets von mindestens 30 Minuten möglich.

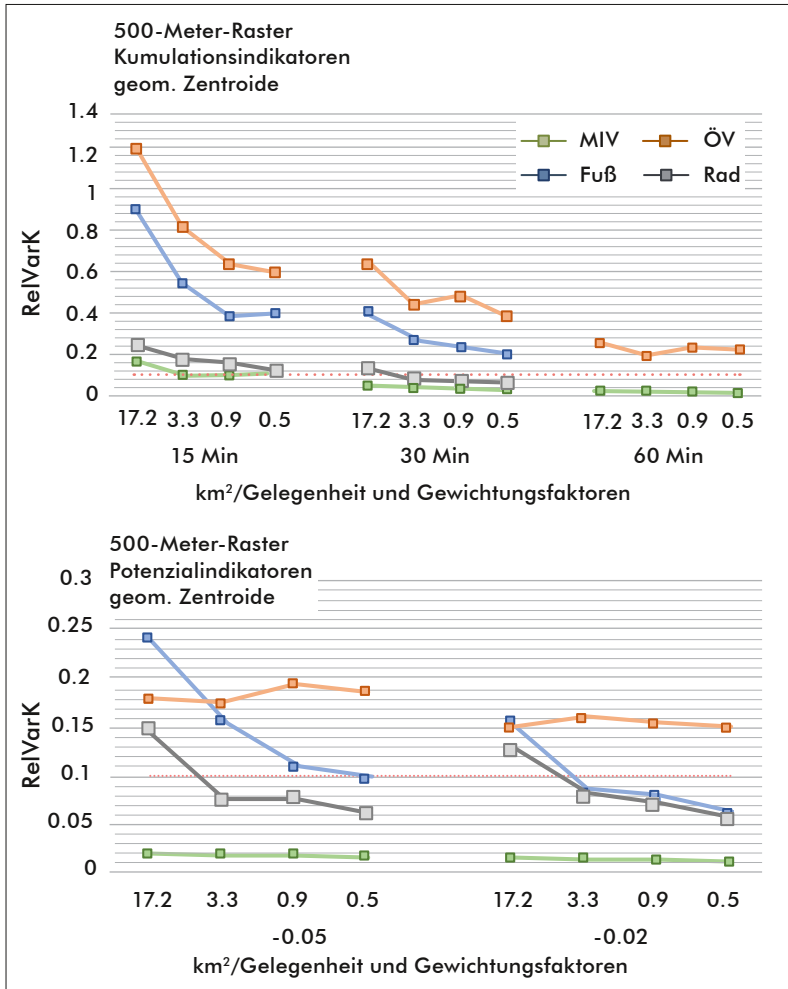
Einzig im Gelegenheitstyp *aperiodische Versorgung* (17,2 km²/Gelegenheit) wird der Grenzwert mit einem eVarK von 0,16 überschritten. Im ÖV liegen die eVarK auch im 60-Minuten-Zeitbudget für alle Gelegenheitstypen zwischen 0,1 und 0,129. Im Radverkehr liegen die eVarK im 500-Meter-Raster und im 15-Minuten-Budget, mit Ausnahme der *aperiodischen Versorgung*, unterhalb von 0,1. Im Fußverkehr liegen diese bei maximal 1,257. Eine zuverlässige Erreichbarkeitsbewertung ist im Fußverkehr also nicht möglich.

Ein Vergleich der RelVarK zwischen Kumulations- und Potenzialindikatoren mit unterschiedlichen Zeitbudgets und Gewichtungsfaktoren zeigt, dass gerade der ÖV und der Fußverkehr von einer hohen Auflösung profitieren (vgl. Abbildung 61). Zudem zeigen alle Analysen einen Anstieg der räumlichen Variation bei einer Abnahme der Zeitbudgets und einer Verringerung des Gewichtungsfaktors sowie der Einrichtungsdichte. Beispielsweise zeigt der RelVarK im ÖV für den *aperiodischen Bedarf* (17,2 km²/Gelegenheit) bei einem Zeitbudget von 15 Minuten und im 500-Meter-Raster einen Wert von 1,231. Dieser Wert gibt an, dass die für die 500-Meter-Zellen berechneten Kumulationsindikatoren im Mittel um 123,1% von der MRE abweichen.

Interessant ist, dass der ÖV bei der Berechnung von Kumulations- und Potenzialindikatoren in Relation zu den übrigen Verkehrsmodi wesentlich stärker profitiert, als bei der Berechnung von Reiseaufwandsindikatoren. Diese Ergebnisse zeigen eine wesentlich stärkere Streuung der ÖV-Erreichbarkeiten auf kleinräumiger Ebene. Eine Besonderheit

Abbildung 61: RelVarK nach Zeitbudget und Gewichtungsfaktor

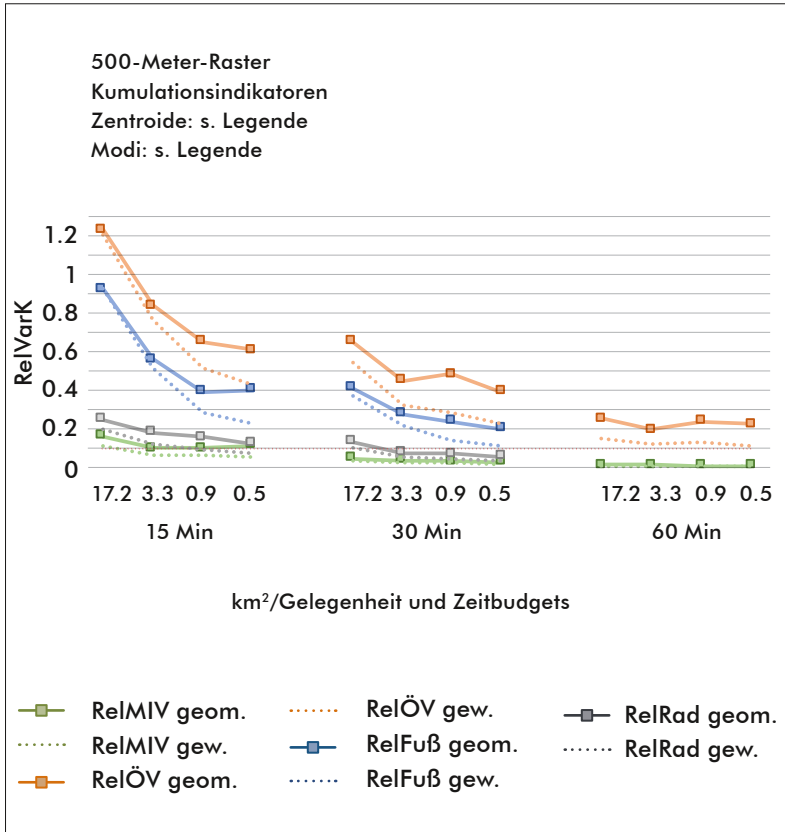
Dargestellt ist der RelVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus, der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen und des verwendeten Zeitbudgets (in Minuten) bzw. Gewichtungsfaktors. Der Linienvorlauf zeigt die durchschnittliche gewichtete Abweichung der unter Einhaltung des Zeitbudgets bzw. unter Berücksichtigung des Gewichtungsfaktors erreichbaren Gelegenheiten im 100-Meter-Raster im Verhältnis zu den erreichbaren Gelegenheiten im 500-Meter-Raster. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert. Im NMIV erfolgte keine Berechnung der Kumulationsindikatoren für ein Zeitbudget von 20 Minuten.



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 62: Gewichtung von Zentroiden und RelVarK im 500-Meter-Raster

Dargestellt ist der RelVarK im 500-Meter-Raster in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus, der Einrichtungsdichte unterschiedlicher Gelegenheitstypen und des verwendeten Zeitbudgets (in Minuten). Der Linienvverlauf zeigt die durchschnittliche gewichtete Abweichung der unter Einhaltung des Zeitbudgets erreichbaren Gelegenheiten im 100-Meter-Raster im Verhältnis zu den erreichbaren Gelegenheiten im 500-Meter-Raster für geometrische und gewichtete Zentroide. Der RelVarK von 0,1 ist der festgelegte Maximalwert.



des öffentlichen Verkehrs, sind die heterogenen und zahlreiche Sprünge aufweisenden Isochronen. Diese erzeugt eine sich vom Individualverkehr deutlich unterscheidende Flächenausdehnung die dazu beitragen könnten, dass bereits geringe Lageunterschiede einen erheblichen Einfluss auf die Berechnung von Kumulationsindikatoren haben. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass Kumulationsindikatoren als ein Näherungswert der Flächenerreichbarkeit interpretiert werden können.

Die Verwendung einwohnergewichteter Zentroide hat einen begrenzten Effekt hinsichtlich des Genauigkeitsergebnisses bei der Berechnung von Reiseaufwandsindikatoren (vgl. Abschnitt 5.2.2). Bei der Berechnung von Kumulationsindikatoren zeigt die Verwendung einwohnergewichteter Zentroide einen positiven Effekt in den Gelegenheitstypen mit einer hohen Einrichtungsdichte (vgl. Abbildung 62). Genauigkeitsverluste im ÖV sind hier, anders als bei der Verwendung von Reiseaufwandsindikatoren, nicht zu verzeichnen. Die Verwendung einwohnergewichteter Zentroide erlaubt es hingegen nicht, die räumliche Auflösung zu reduzieren und gleichzeitig eine hohe Genauigkeit zu erhalten.

Aufgrund der hohen Variation der Erreichbarkeitswerte ist es nicht ratsam, Kumulationsindikatoren für stark aggregierte Gebietseinheiten zu berechnen. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen bereits Benenson et al. (2017b, S. 228), die die Zunahme der internen Homogenität bei größeren Zeitbudgets unterstrichen. Der Vergleich mit Potenzialindikatoren zeigt, dass diese eine wesentlich geringere räumliche Variation erzeugen. Diese sind, auch innerhalb der dargestellten Raumbezugssysteme, mit den eVarK der Kumulationsindikatoren und einem Zeitbudget von 60 Minuten nahezu identisch. Dies liegt daran, dass auch hohe Reisezeiten berücksichtigt werden, diese aber zu einer Abwichtung der Zielpotenziale führen (vgl. Abschnitt 3.6).

Schlussfolgerungen

Die Auswertungen zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Modellgenauigkeit von der Dichte der berücksichtigten Gelegenheiten. Gerade die Berechnung der Naherreichbarkeit profitiert aufgrund der relativ geringen Reisezeiten von einer hohen räumlichen Auflösung. Bereits Hewko et al. (2002, S. 1195) beschreiben dieses Ergebnis als eine Konsequenz

des Zentroidproblems. Bei der Berechnung der Erreichbarkeit für Gelegenheitstypen mit einer hohen Einrichtungsdichte ist also eine hohe Auflösung des Raumbezugssystems zu verwenden. Zudem sollte auch von den in einer Erreichbarkeitsanalyse eingesetzten Erreichbarkeitsindikatoren die räumliche Auflösung abhängen. Gerade die Berechnung von Kumulationsindikatoren für den ÖV mit einem Zeitbudget von unter einer Stunde erzeugt bereits im 500-Meter-Raster relevante Aggregationsfehler. In niedriger aufgelösten Raumbezugssystemen besitzen die Berechnungsergebnisse im ÖV keine hinreichende Repräsentativität gegenüber der Siedlungsfläche und der Wohnbevölkerung. Hier wirken die im Vergleich zum Individualverkehr ungleichmäßigen und mit Sprüngen versehenen Isochronen. Auch bei der Berechnung von Kumulations- und Potenzialindikatoren geht die räumliche Variation mit der mittleren Reisezeit deutlich zurück. Im Unterschied zu Reiseaufwandsindikatoren sind bei der Berücksichtigung weniger Gelegenheiten jedoch erheblich höhere eVarK zu verzeichnen. Dies liegt an der höheren Bedeutung der relativen Erreichbarkeitsunterschiede. Beispielsweise ist der Erreichbarkeitsunterschied zwischen 500 und 510 Arbeitsplätzen im Vergleich zum Unterschied zwischen 5 und 15 Arbeitsplätzen weniger relevant.

5.5 Schlussfolgerungen zur räumlichen Auflösung

Dieses Kapitel widmete sich dem Einfluss der räumlichen Auflösung, der Detaillierung der Verkehrsgraphen und der Ausgestaltung von Erreichbarkeitsindikatoren auf die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen. Grundsätzlich sollten Erreichbarkeitsmodelle möglichst einfach aufgebaut sein und somit ihre Nutzbarkeit erhöhen. Gleichzeitig ist eine hohe Genauigkeit der Modellergebnisse zu gewährleisten. Die Ursache für Genauigkeitsverluste sind vor allem unterschiedliche Aggregationsfehler (vgl. Abschnitt 2.2.3.2). Die Auswertungen zeigen wesentliche Unterschiede zwischen den einzelnen Verkehrsmodi, Modellierungsansätzen und Indikatoren. Einige Ergebnisse widersprechen den zuvor getroffenen Annahmen deutlich. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst (Abschnitt 5.5.1) und Empfehlungen für den Aufbau regionaler Erreichbarkeitsmodelle gegeben (Abschnitt 5.5.2). Der Zusammenfassung liegt die Einhaltung maximaler VarK von 0,1

zugrunde (vgl. Abschnitt 5.1.2). Ein Wert von 0,1 entspricht einer gewichteten mittleren Abweichung der Erreichbarkeitswerte von der MRE von 10%. Abhängig vom Anwendungsfall können auch andere Grenzwerte zugrunde gelegt werden.

5.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten ist in Abhängigkeit von unterschiedlichen Anwendungsfällen dargestellt, welche räumliche Auflösung mindestens zu verwenden ist, ohne einen maximalen Genauigkeitsverlust von 10,0% zu überschreiten. In Abschnitt 5.5.2 werden darauf aufbauende Empfehlungen für den Aufbau regionaler Erreichbarkeitsmodelle gegeben.

Räumliche Auflösung mit detaillierten Verkehrsgraphen

Die Analyseergebnisse zeigen wesentliche Genauigkeitsunterschiede in Abhängigkeit von der Detaillierung der Verkehrsgraphen (vgl. Abschnitt 5.3.5). Eine reduzierte Detaillierung erhöht die Variation von Erreichbarkeitswerten und macht tendenziell höher aufgelöste Raumbezugssysteme erforderlich. Entsprechend hängt die Wahl des Raumbezugssystems von der Detaillierung der Verkehrsgraphen ab. Die Wahl des Raumbezugssystems wird zusätzlich von der Gewichtung der Zentroide, dem Widerstandsparameter und den Erreichbarkeitsindikatoren bestimmt. Die folgenden Aussagen beziehen sich auf die Verwendung von geometrischen Zentroiden und Reiseaufwandsindikatoren auf Basis der Reisezeit. Es wird davon ausgegangen, dass die Berechnung reisezeitminimierender Verbindungen zu unterschiedlichen Gelegenheiten den relevantesten Praxisfall darstellt.

In Tabelle 49 sind die in den einzelnen Verkehrsmodi und in Abhängigkeit von der Gelegenheitsdichte zu verwendenden Raumbezugssysteme dargestellt. Zur Modellierung der Erreichbarkeit im Fußverkehr sollte grundsätzlich ein 100-Meter-Raster verwendet werden, im ÖV ist bei einer geringen Einrichtungsichte auch der Einsatz eines 500-Meter-Rasters möglich. Im Radverkehr ist das 100-Meter-Raster bei den höchsten Gelegenheitsdichten erforderlich. Bei einer geringen Einrichtungsichte ist im MIV indes die Nutzung von Gemeinden, statistischen Gebieten oder einem 5-Kilometer-Raster denkbar. Die Empfehlungen beziehen sich auf den RelVarK, sind also gegenüber der bewohnten

Fläche und nicht gegenüber den Einwohnern repräsentativ. Wenn nicht ausschließlich auf kartographische Darstellung zurückgegriffen wird, ist die Einwohnerverteilung zwischen den einzelnen Raumeinheiten relevant. Wird diese Verteilung berücksichtigt, erhöht sich die durchschnittliche Abweichung von der MRE deutlich, da in einwohnerstarken Gebieten eine größere Variation besteht (vgl. Abschnitt 5.2.1). Im MIV ist dann grundsätzlich ein 500-Meter-Raster einzusetzen. Lediglich bei mehr als 1 Tsd. km²/Gelegenheit kann ein 1-Kilometer-Raster zu repräsentativen Erreichbarkeitswerten führen. Im Radverkehr ist bei einer Dichte von maximal 100 km²/Gelegenheit ein 100-Meter-Raster und anschließend ein 500-Meter-Raster einzusetzen. Im ÖV sollte grundsätzlich ein 100-Meter-Raster zur Anwendung kommen.

Im MIV hängt die räumliche Variation der Erreichbarkeitswerte insbesondere von der Wahl des Widerstandsattributes ab (vgl. Abbildung 54). Die auf Basis der Reisezeit ermittelten Reiseaufwandsindikatoren werden durch die Modellierung einer vereinfachter PRZ gerade auf kurzen Distanzen deutlich geglättet (vgl. Abschnitt 5.3.3). Gleichwohl konnte gezeigt werden, dass die Rangfolge zwischen den Erreichbarkeitswerten je Raumeinheit nahezu identisch bleibt. Insofern nehmen die relativen Unterschiede zwar ab und andere planerische und wissenschaftliche Schlussfolgerungen sind nur bei einem Vergleich zwischen Verkehrsmodi denkbar.

Tabelle 49: Raumbezugssysteme bei Reiseaufwandsindikatoren der Reisezeit
 Annahmen: Geometrische Zentroide und einfache RelVarK; maximaler RelVarK = 0,1;
 * Gilt zusätzlich für statistische Gebiete in Hamburg; Angegeben sind die Auflösungen von Rastermodellen

km ² /Gelegenheit	MIV	Fuß	Rad	ÖV
< 25	500-Meter	100-Meter	100-Meter	100-Meter
26 – 100	1-Kilometer	100-Meter	100-Meter	100-Meter
101 – 1 Tsd.	1-Kilometer	100-Meter	1-Kilometer	500-Meter
> 1 Tsd.	Gemeinden*/ 5-Kilometer	100-Meter	1-Kilometer	500-Meter

Quelle: eigene Darstellung

Insofern nehmen die relativen Unterschiede zwar ab, völlig andere planerische und wissenschaftliche Schlussfolgerungen sind jedoch nicht zu erwarten. Oder nur dann, wenn diese auf einem Vergleich der einzelnen Verkehrsmodi basieren. Da die Modellierung detaillierter PRZ im MIV aufgrund fehlender Daten und fehlenden Wissen bisher nicht möglich ist, kommen zumeist konstante Zeitaufschläge zum Einsatz. Bezieht sich der Reiseaufwand indes auf die kürzeste und nicht auf die schnellste Strecke, ist eine wesentlich höhere Auflösung im MIV zu verwenden (vgl. Tabelle 50).

Tabelle 50: Raumbezugssysteme im MIV in Relation zur Fläche und zur Einwohnerzahl

Annahmen: Geometrische Zentroide und einfache RelVarK; maximaler RelVarK = 0,1; Angegeben sind die Auflösungen von Rastermodellen

km ² /Gelegenheit	MIV Meter (Fläche)	MIV Meter (Einwohner)
< 25	100-Meter	100-Meter
26 – 100	100-Meter	100-Meter
101 – 1 Tsd.	1-Kilometer	100-Meter
> 1 Tsd.	Gemeinden	1-Kilometer

Quelle: eigene Darstellung

Räumliche Auflösung mit vereinfachten Verkehrsgraphen

Untersucht wurde außerdem, inwiefern die Detaillierung der Verkehrsgraphen die notwendige räumliche Auflösung beeinflusst. Vermutet wurde ein positiver Einfluss der Detaillierung auf die räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten (vgl. Abschnitt 1.7.3). Der Vergleich basierte auf drei Detaillierungsstufen einzelner Modellparameter des MIV, NMIV und ÖV. Als Maximalfall diente jeweils die weitgehende Umsetzung des Tür-zu-Tür-Ansatzes (vgl. Abschnitt 3.5). Im ÖV basiert der vereinfachte Fall auf der Anbindung mehrerer nächster Haltestellen per Luftlinie, der Minimalfall auf der Luftlinienanbindung der nächsten Haltestelle. Die Bedeutung der Haltestellenanbindung bei der Erreichbarkeitsberechnung und der Streuung von Erreichbarkeitswerten ist unbestritten (Benenson et al. 2017b, S. 214, 215, Djurhuus et al. 2016). Indes war nicht zu erwarten, dass sich der RelVarK deutlich erhöht, wenn lediglich eine Anbindung über Luftlinien erfolgt. Dieser Befund ist bei

Gelegenheitstypen mit einer hohen Dichte besonders ausgeprägt. Dies bedeutet auch, dass im ÖV bei einer Vereinfachung der Haltestellenanbindung grundsätzlich auf ein 100-Meter-Raster zurückzugreifen ist (vgl. Tabelle 51).

Tabelle 51: Raumbezugssysteme im ÖV nach Detaillierungsstufen

Annahmen: Geometrische Zentroide und einfache RelVarK; maximaler RelVarK = 0,1; Angegeben sind die Auflösungen von Rastermodellen

km ² /Gelegenheit	Maximalfall	vereinfachter Fall	Maximalfall
< 25	100-Meter	100-Meter	100-Meter
26 – 100	100-Meter	100-Meter	100-Meter
101 – 1 Tsd.	500-Meter	100-Meter	100-Meter
> 1 Tsd.	500-Meter	100-Meter	100-Meter

Quelle: eigene Darstellung

Im NMIV wurden die Streuungen der Realdistanzen (Maximalfall) und Luftlinienentfernungen verglichen (Minimalfall). Da der Fußverkehr bereits im Maximalfall in einem 100-Meter-Raster zu bewerten ist, ermöglicht eine weitere Vereinfachung der Widerstandsberechnung keine Reduzierung der räumlichen Auflösung. Gleichwohl zeigt die deutliche Zunahme der räumlichen Variation von Erreichbarkeitswerten auch hier, dass bereits auf Ebene des 100-Meter-Rasters relevante Ungenauigkeiten produziert werden (vgl. Abschnitt 5.3.2). Aufgrund dieser Vereinfachung ist aber auch im Radverkehr ausschließlich auf ein 100-Meter-Raster zurückzugreifen.

Im MIV kann bei Verwendung eines pauschalen Zeitaufschlags von fünf Minuten (vereinfachter Fall) zur Modellierung der PRZ eine im Vergleich zum Maximalfall etwas geringere räumliche Auflösung verwendet werden. Der pauschale Zeitaufschlag führt zu einer Glättung der relativen Erreichbarkeitsunterschiede. Dabei nimmt die Glättung mit der Höhe des Zeitaufschlags stetig zu. Bei einem Verzicht auf die PRZ wird die Reisezeit im MIV gerade in Städten deutlich unterschätzt. Gleichzeitig nimmt die Variation der Reisezeiten erheblich zu. Daher sollte bei einem Verzicht auf die PRZ zumindest auf eine wesentlich höhere Auslösung zurückgegriffen werden. Dies erfordert zumindest in Gelegenheitstypen mit einer hohen Einrichtungsdichte die Verwendung eines 100-Meter-Rasters.

Tabelle 52: Raumbezugssysteme im MIV nach Detaillierungsstufen

Annahmen: Geometrische Zentroide und einfache RelVarK; maximaler RelVarK = 0,1

*Gilt zusätzlich für statistische Gebiete in Hamburg; Angegeben sind die Auflösungen von Rastermodellen

km ² /Gelegenheit	Maximalfall	vereinfachter Fall	Manimalfall
< 25	500-Meter	1-Kilometer	100-Meter
26 – 100	1-Kilometer	1-Kilometer	500-Meter
101 – 1 Tsd.	1-Kilometer	1-Kilometer*	1-Kilometer
> 1 Tsd.	Gemeinden*/ 5-Kilometer	Gemeinden*/ 5-Kilometer	Gemeinden

Quelle: eigene
Darstellung

Räumliche Auflösung und gewichtete Zentroide

Die Verwendung von gewichteten Zentroiden ist dann sinnvoll, wenn Erreichbarkeiten für kartographische Darstellungen berechnet werden (vgl. Tabelle 53). Gerade der NMIV profitiert mit einer zunehmenden Einrichtungsdichte von gewichteten Zentroiden (vgl. Abschnitt 5.2.2). Im MIV wird auch ohne die Gewichtung von Zentroiden eine hohe Genauigkeit erzielt. Ihre aufwendige Berechnung ist also nicht erforderlich. Werden Erreichbarkeiten nicht nur für Flächen, sondern für Einwohner berechnet, reduziert sich der Nutzen gewichteter Zentroide erheblich. Gerade in

Tabelle 53: Raumbezugssysteme bei Reiseaufwandsindikatoren der Reisezeit und gewichteten Zentroiden

Annahmen: Geometrische Zentroide und einfache RelVarK maximaler RelVarK = 0,1

*Gilt zusätzlich für statistische Gebiete in Hamburg; Angegeben sind die Auflösungen von Rastermodellen

km ² /Gelegenheit	MIV	Fuß	Rad	ÖV
< 25	1-Kilometer	100-Meter	100-Meter	100-Meter
26 – 100	1-Kilometer	100-Meter	500-Meter	500-Meter
101 – 1 Tsd.	1-Kilometer	100-Meter	1-Kilometer	500-Meter
> 1 Tsd.	Gemeinden*/ 5-Kilometer	500-Meter	1-Kilometer	1-Kilometer

Quelle: eigene
Darstellung

einwohnerstarken Gebieten hat eine Gewichtung mitunter keinen Nutzen, da gewichtete und geometrische Zentroide häufig weitgehend identisch sind. Auch kommt es gerade im ÖV häufig vor, dass sich die Genauigkeit von Erreichbarkeitswerten aufgrund einer geringeren Repräsentativität gewichteter Zentroide gegenüber dem Verkehrsangebot reduziert (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Räumliche Auflösung und komplexe Erreichbarkeitsindikatoren

Zwar kommen in der Planungspraxis zumeist Reiseaufwandsindikatoren zum Einsatz, gleichwohl werden gerade in Nordamerika häufig auch Kumulations- und Potenzialindikatoren verwendet (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Die in Abschnitt 5.4 vorgestellten Analysen zeigen, dass die räumliche Variation von Erreichbarkeitswerten mit der Einrichtungs-dichte abnimmt, dem ermittelten Effekt bei der Berechnung von Reiseaufwandsindikatoren also direkt entgegenläuft. Auch die Erhöhung des Zeitbudgets bei den Kumulationsindikatoren und eine Verringerung der Abwichtung bei den Potenzialindikatoren führen zu einem Rückgang der räumlichen Variation.

Tabelle 54: Raumbezugssysteme bei Kumulations- und Potenzialindikatoren

Annahmen: Geometrische Zentroide und einfache RelVarK; maximaler RelVarK = 0,1

* Gilt zusätzlich für statistische Gebiete in Hamburg; Angegeben sind die Auflösungen von Rastermodellen; „/“: Indikator wurde nicht ermittelt.

	MIV	Fuß	Rad	ÖV
15 Minuten	100-Meter	100-Meter	100-Meter	100-Meter
30 Minuten	1-Kilometer*	100-Meter	100-Meter	100-Meter
60 Minuten	Gemeinden*/ 5-Kilometer	/	/	100-Meter
1 Kilometer	/	100-Meter	100-Meter	/
5 Kilometer	100-Meter	100-Meter	100-Meter	/
30 Kilometer	1-Kilometer*	/	/	/
0 Umstiege	/	/	/	100-Meter
-0,02	Gemeinden*/ 5-Kilometer	100-Meter	100-Meter	100-Meter
-0,05	5-Kilometer*	100-Meter	100-Meter	100-Meter

Quelle: eigene Darstellung

Wenn eine maximal Abweichung von 10% gegenüber der MRE nicht überschritten werden soll, sind die in Tabelle 54 vorgeschlagenen Raumbezugssysteme einzusetzen. Folglich ist, abgesehen vom MIV, zumeist auf die maximale Auflösung zurückzugreifen. Gleichwohl kann bei Gelegenheiten mit einer hohen Dichte (Arbeitsplätze, Wohnstandorte) mitunter auch auf ein 500-Meter-Raster zurückgegriffen werden. Es entsteht jedoch ein Dilemma, da die Berechnung dieser Indikatoren, gerade bei Verwendung einer hohen räumlichen Auflösung, sehr zeitaufwendig ist. Zwar hat die Gewichtung von Zentroiden einen positiven Effekt auf die Genauigkeit der Ergebnisse, dennoch ermöglicht auch diese Gewichtung nicht die Verwendung einer geringeren Auflösung (vgl. Abbildung 47).

Kartographische Darstellungen und Erreichbarkeitsdiagramme

Der Umgang mit den berechneten Erreichbarkeitswerten beeinflusst auch die Wahl des zugrundeliegenden Raumbezugssystems. Grundsätzlich sind zwei Perspektiven zu unterscheiden. Erstens ist es möglich, Erreichbarkeiten im 100-Meter-Raster zu berechnen und anschließend zu aggregieren. Dieses würde den Modellaufbau und die Erreichbarkeitsberechnung zwar nicht vereinfachen, böte aber weitergehende Optionen bei der kartographischen Darstellung (Madelin et al. 2009). Die zweite Ebene berührt die Aufbereitung der Erreichbarkeitswerte über Rundungen und Klassifizierungen. Auch hier ist eine Glättung von Erreichbarkeitsunterschieden denkbar.

Mit dem eVarK wurde die Streuung der innerhalb einer Raumeinheit liegenden Referenzwerte ermittelt. Eine geringe Streuung deutet darauf hin, dass die Einzelwerte mit einem geringen Genauigkeitsverlust zu aggregieren sind. Dabei handelt es sich um den minimalen Verlust an Genauigkeit bei einer weiteren räumlichen Aggregation (vgl. Abbildung 39). Ein solcher Umgang mit Erreichbarkeitswerten würde nur im Fußverkehr und bei einer hohen Einrichtungsdichte die Berechnung im 100-Meter-Raster erfordern. In den übrigen Modi kann in der Regel auf ein 1-Kilometer-Raster zurückgegriffen werden. Entsprechend ist es möglich, aggregierte Erreichbarkeitswerte für relativ gering aufgelöste Raumeinheiten kartographisch darzustellen. Sind die Erreichbarkeitswerte in den einzelnen Raumeinheiten auf die Wohnbevölkerung zu übertragen, ist die Auflösung jeweils um eine Stufe zu erhöhen.

Tabelle 55: Raumbezugssysteme bei Aggregation von Reiseaufwandsindikatoren

Annahmen: Geometrische Zentroide und einfache VarK; maximaler einfacher VarK = 0,1

*Gilt zusätzlich für statistische Gebiete in Hamburg; Angegeben sind die Auflösungen von Rastermodellen

km ² /Gelegenheit	MIV	Fuß	Rad	ÖV
< 25	1-Kilometer	100-Meter	500-Meter	500-Meter
26 – 100	1-Kilometer	100-Meter	1-Kilometer	500-Meter
101 – 1 Tsd.	1-Kilometer*	500-Meter	1-Kilometer	1-Kilometer
> 1 Tsd.	Gemeinden*/ 5-Kilometer	500-Meter	1-Kilometer*	1-Kilometer

Quelle: eigene Darstellung

Die Rundung von Erreichbarkeitswerten hat keinen entscheidenden Einfluss auf die Wahl des Raumbezugssystems. Lediglich in einem sehr begrenzten Umfang erhöht sich die Variation von Erreichbarkeitswerten im MIV und Radverkehr (vgl. Abbildung 56). Sehr viel stärker ist der Einfluss der Klassifizierung. Diese bewirkt hier eine umfangreiche Glättung der Erreichbarkeitswerte im MIV und Radverkehr (vgl. Abbildung 57). Im deutlich langsameren Fußverkehr und im ÖV ist dieser Effekt schwächer ausgeprägt. Dies führt in der Summe auch zu relativen Erreichbarkeitsverschiebungen zwischen den Einzelnen Modi. Zu bedenken ist allerdings, dass die Spannbreite der einzelnen Klassen diesen Effekt maßgeblich beeinflusst. Die Beispielrechnung basiert auf sechs größengleichen Klassen zwischen null und 60 Minuten. Tabelle 56 zeigt die zu verwendenden Raumbezugssysteme bei einer anschließenden Klassifizierung der Erreichbarkeitswerte. Im MIV und im Radverkehr kann eine geringe Auflösung verwendet werden. Im Hamburger Stadtgebiet ist die Nutzung der statistischen Gebiete in der Regel hinreichend. Im Fußverkehr und im ÖV sollte nach wie vor auf eine hohe räumliche Auflösung zurückgegriffen werden.

Tabelle 56: Empfohlene Raumbezugssysteme bei klassifizierten Reiseaufwandsindikatoren

Annahmen: Geometrische Zentroide und einfache RelVarK; maximaler RelVarK = 0,1;
 * Gilt zusätzlich für statistische Gebiete in Hamburg; Angegeben sind die Auflösungen von Rastermodellen

km ² /Gelegenheit	MIV	Fuß	Rad	ÖV
< 25	1-Kilometer*	100-Meter	500-Meter*	100-Meter
26 – 100	1-Kilometer*	100-Meter	1-Kilometer	100-Meter
101 – 1 Tsd.	1-Kilometer*	100-Meter	1-Kilometer*	500-Meter
> 1 Tsd.	Gemeinden*	100-Meter	1-Kilometer*	500-Meter

Quelle: eigene Darstellung

Umwegfaktoren, Höhendaten und Haltestellenanbindungen

Die Auswertungen liefern weitere Hinweise für den Aufbau von Verkehrsgraphen in regionalen Erreichbarkeitsmodellen. Die Auswertungen haben ergeben, dass ein Umwegfaktor von 1,38 bei der Umrechnung von Luftlinienweiten in Realdistanzen die tatsächlichen Entfernungen bestmöglich repräsentiert (vgl. Abschnitt 5.3.2). In der Regel wird jedoch auf den von der FGSV vorgeschlagenen Umwegfaktor von 1,2 zurückgegriffen (FGSV 2014, S. 23). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Neuberechnung des Umwegfaktors auf Ebene des 100-Meter-Rasters erfolgte und diese Berechnung ebenfalls vom Zentroidproblem beeinflusst wird. Die Auswertungen zeigen außerdem, dass die Verwendung eines Höhenmodells (SRTM-Modell) im norddeutschen Tiefland keinen Anstieg der räumlichen Variation von Erreichbarkeitswerten erzeugt (vgl. Abschnitt 5.3.2). Folglich kann auf den arbeitsintensiven Einsatz eines solchen Modells verzichtet werden. Beim Aufbau des intermodalen ÖV-Verkehrsgraphen ist auf eine maximale Anzahl der anzubindenden Haltestellen zu verzichten. In diesem Modell erfolgt die Anbindung der Raumeinheiten und Gelegenheiten an die nächsten sechs Bus- und drei Bahnhaltestellen. Es existieren jedoch städtische Gebiete, die auch unter diesen Annahmen keine Berechnung der reisezeitminimierenden Verbindung sicherstellen.

5.5.2 Empfehlungen für den Aufbau regionaler Erreichbarkeitsmodelle

Ein multimodales Erreichbarkeitsmodell mit zahlreichen Gelegenheitstypen der Daseinsvorsorge müsste auf einem bewohnten 100-Meter-Raster basieren, um für alle Verkehrsmodi und Einrichtungstypen die Erreichbarkeit mit einer hohen Genauigkeit zu berechnen. Gleichwohl sind unterschiedliche Vorgehensweisen denkbar, um mit den in Abschnitt 5.5.1 vorgestellten Minimalauflösungen in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus, Gelegenheitstyp und Erreichbarkeitsindikator umzugehen.

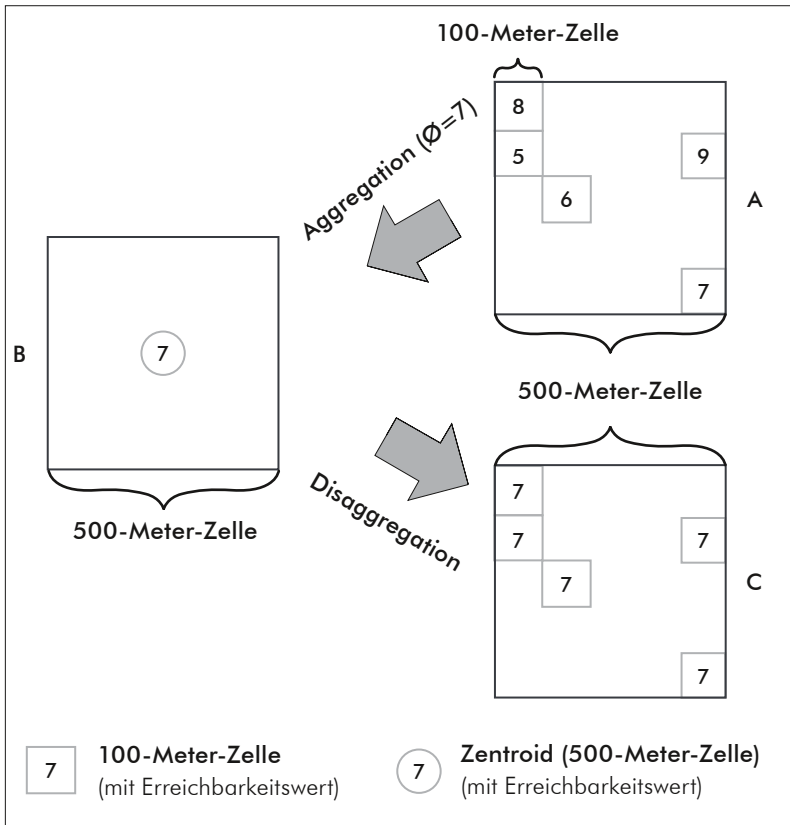
Kombination unterschiedlicher Raumbezugssysteme

Eine Möglichkeit besteht darin, unterschiedliche Raumbezugssysteme in einem Erreichbarkeitsmodell zu verbinden. Auch im DVAN werden in Abhängigkeit vom Verkehrsmodus und der Distanz zu nächster Einrichtung vier Rastermodelle kombiniert (Peter 2019). Um dennoch eine einheitliche Analyseebene zu erhalten ist es anschließend möglich, Erreichbarkeitswerte zu aggregieren oder zu disaggregieren. Beispielsweise können die im MIV auf Ebene eines 500-Meter-Rasters berechneten Erreichbarkeitswerte auf alle bewohnten 100-Meter-Zellen innerhalb der Rasterzellen übertragen werden (vgl. Abbildung 63; B --> C). Dieses Verfahren erzeugt keinen Informationsverlust. Die Aggregation von Erreichbarkeitswerten in ein niedriger aufgelöstes Raumbezugssystem über den Mittelwert einer Verteilung von Erreichbarkeitswerten bedeutet indes eine Reduktion der Genauigkeit (vgl. Abschnitt 5.1.2). Beispielsweise wäre es möglich, die im bewohnten 100-Meter-Raster berechneten Gehzeiten zum nächsten Supermarkt über ihren Mittelwert auf ein 500-Meter-Raster zu aggregieren (vgl. Abbildung 63; B --> C). Dies hätte einen dem eVarK entsprechenden Informationsverlust zur Folge. Die Vorteile im Vergleich zur Disaggregation von Erreichbarkeitswerten sind jedoch der wesentlich geringere Speicherbedarf und das geringere Transfervolumen bei Webanwendungen.

Gezielter Genauigkeitsverzicht in einzelnen Anwendungsbereichen

Eine weitere Möglichkeit ist die Nichteinhaltung des in Abschnitt 5.1.3 festgelegten maximalen VarK. In multimodalen Erreichbarkeitsmodellen mit einem regionalen Anwendungsfokus wäre es beispielsweise möglich,

Abbildung 63: Aggregation und Disaggregation von Erreichbarkeitswerten



auf ein bewohntes 100-Meter-Raster zu verzichten und umfangreiche Genauigkeitsverluste insbesondere im Fußverkehr in Kauf zu nehmen. Diesem Vorgehen liegt die Abwägung zwischen der Modellgenauigkeit und der Relevanz des Fußverkehrs im regionalen Kontext zugrunde. Auch ist es möglich, einzelne Erreichbarkeitswerte nur in klassifizierter Form bereitzustellen, um den Einfluss möglicher Genauigkeitsverluste zu reduzieren. Unabhängig vom Anwendungsfall sind die möglichen Ungenauigkeiten transparent darzustellen. Die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen liefern in diesem Zusammenhang wichtige Ansätze. Auch aus dem bisher nicht geklärten Zusammenhang zwischen Aggregationsfehlern einerseits und planerischen Schlussfolgerungen andererseits kann auf die Verwendung einer geringen Auflösung geschlossen werden, da der planerische Nutzen einer hohen Auflösung nicht gesichert ist. Die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse dienen also nicht nur als Begründung für die Verwendung einer möglichst hohen räumlichen Auflösung, sondern auch der Interpretation von Erreichbarkeitswerten auf unterschiedlichen Auflösungsebenen. Solche Einschätzungen sind wichtig, da auch zukünftig die räumliche Auflösung als eine Herausforderung im Umgang mit Erreichbarkeitsmodellen bestehen bleibt.

6 Schluss

Im abschließenden Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst und ihre Übertragbarkeit auf andere Regionen und Anwendungsgebiete diskutiert. Abschließend erfolgen die kritische Einordnung der entwickelten Untersuchungsmethode und die Skizzierung des weiteren Forschungsbedarfs.

6.1 Kurzbeantwortung der Forschungsfragen

Wie muss ein Erreichbarkeitsmodell aufgebaut sein, um multimodale und kleinräumige Erreichbarkeiten mit einer hohen Genauigkeit abzubilden?

Das entwickelte Erreichbarkeitsmodell ermöglicht die kleinräumige Realisierung des Tür-zu-Tür-Ansatzes auf einem multimodalen Verkehrsgraphen und mit den kostenpflichtigen Computerprogrammen ArcGIS und PTV Visum. Die Strukturdatenbasis deckt alle wesentlichen Bereiche der Daseinsvorsorge ab und kann mit Ausnahme der Arbeitsplätze ausschließlich mit Hilfe freier oder zumindest kostenloser Daten aufgebaut werden. Die Verwendung des HDF5-Formats zur Datenverwaltung garantiert einen effizienten Datenzugriff und ermöglicht auch die Berechnung unterschiedlicher komplexer Erreichbarkeitsindikatoren. Aufgrund der hohen Detaillierung der Verkehrsgraphen und der umfangreichen adressscharfen Strukturdatenbasis ist von einer hohen Genauigkeit des Erreichbarkeitsmodells auszugehen. Gleichzeitig erschwert die Verwendung eigener Python-Skripte und die Nutzung kostenpflichtiger Software die Überbrückung der implementation gap (vgl. Abschnitt 1.3.1). Der Modellierung tageszeitabhängiger Reisezeiten im MIV mit Hilfe eines Nachfragemodells ist ein regelbasiertes Verfahren vorzuziehen. Der hohe Erstellungsaufwand und der begrenzte Nutzen eines Nachfragemodells sind indes keine adäquaten Antworten auf das rigor-relevance dilemma.

Mit dem Erreichbarkeitsmodell lassen sich alle häufig genutzten einfachen und komplexen Erreichbarkeitsindikatoren berechnen. Zu diesen gehört auch die kleinräumige Berechnung von Kumulationsindikatoren mit einem Zeitbudget von 60 Minuten. Änderungen an der Strukturdatenbasis und den Verkehrsgraphen erlauben außerdem die Bewertung von Szenarios. Gleichwohl stellen die langen Rechenzeiten bei der Berechnung komplexer Indikatoren nach wie vor ein wesentliches Hindernis dar.

Welche Verfahren zur Modellierung der Erreichbarkeit mit öffentlichen Verkehrsmitteln werden in der Nahverkehrsplanung aktuell eingesetzt?

Insgesamt zeigt sich in den NVP der MRH ein unstrukturierter und nur selten stringenter Umgang mit Erreichbarkeitszielen, -standards und -analysen. Erreichbarkeitsziele werden häufig formuliert und anschließend nicht über Erreichbarkeitsstandards oder Erreichbarkeitsindikatoren formalisiert. Auch auf die Überprüfung von festgelegten Standards wird häufig verzichtet. Zudem beziehen sich die durchgeführten Erreichbarkeitsanalysen häufig nicht auf die zuvor definierten Standards oder die formulierten Ziele.

Bei den durchgeführten Erreichbarkeitsanalysen steht in der Regel die Bewertung der Erschließungs- und Bedienungsqualität mit Hilfe einfacher und infrastrukturbasierter Erreichbarkeitsindikatoren im Zentrum. Ein häufiges Beispiel die Bestimmung der Einwohnerzahl, die von einem definierten Bedienstandard profitiert. Die Operationalisierung der Verbindungsqualität erfolgt zumeist über die Erreichbarkeit zentraler Orte. Die Sicherung der Daseinsvorsorge ist aufgrund des Fehlens der relevanten Gelegenheitstypen zumeist nicht Gegenstand in NVP.

Die in den NVP aufgeführten Erreichbarkeitsanalysen sind zumeist auf Gemeinde- oder Haltestellenebene aufgelöst. Die Verwendung kleinräumiger Rastermodelle ist hingegen die absolute Ausnahme. Die geringe räumliche Auflösung erlaubt in der Regel den Einsatz webbasierter Verbindungsabfragen. Komplexe ÖV-Verkehrsgraphen kommen nur selten zum Einsatz. Einige Analysen, insbesondere zur Erschließungsqualität, basieren auf einfachen GIS-Abfragen. Ein GIS-Routing wird jedoch

nur in wenigen Fällen zur Berechnung der fußläufigen Haltestellenanbindung oder vergleichender MIV-Reisezeiten eingesetzt.

Mit dem in der ersten Forschungsfrage vorgestellten regionalen Erreichbarkeitsmodell wäre es möglich, die Bewertung der ÖPNV-Angebotsqualitäten in den NVP um Gelegenheiten der Daseinsvorsorge zu erweitern und kleinräumig durchzuführen. Darüber hinaus wäre eine stärkere räumliche und zeitliche Differenzierung der einzelnen Raumwiderstände mit Hilfe der verwendeten Fahrplandaten möglich. In einem NVP ließe sich darstellen, in welchem Umfang die Sicherung der Daseinsvorsorge mit öffentlichen Verkehrsmitteln gewährleistet wird. Innerhalb der NVP würde dies die Verschiebung von der Angebotsbeschreibung zur Bewertung der bereitgestellten Mobilitätsoptionen erfordern.

Wie beeinflusst die räumliche Auflösung die Genauigkeit von Erreichbarkeitsmodellen unter besonderer Berücksichtigung multimodaler Verkehrsgraphen?

Die Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen auf Basis der Reisezeit im MIV erhöht sich bei der Verwendung sehr hoch aufgelöster Raumbezugssysteme in der Regel nicht. Vor allem die Integration kaumdifferenzierter parkbezogener Reisezeiten führt im MIV zu einer Glättung realer Erreichbarkeitsunterschiede. Wird indes die Reiseweite als maßgebliches Widerstandsattribut verwendet oder auf die PRZ verzichtet, ist die Verwendung eines 100-Meter-Rasters zumindest bei einer hohen Einrichtungsdichte sinnvoll. Erreichbarkeitsanalysen in den übrigen Verkehrsmodi profitieren hingegen wesentlich stärker von einer hohen räumlichen Auflösung.

Der Nutzen einer hohen Auflösung nimmt mit der Dichte der Gelegenheiten im Untersuchungsgebiet deutlich zu und wird entscheidend von den mittleren Distanzen zu nächsten Einrichtungen beeinflusst. Die Einwohnergewichtung von Zentroiden kann die entstehenden Genauigkeitsverluste verringern. Doch erzeugen einwohnergewichtete Zentroide gerade im ÖV mitunter zusätzliche Ungenauigkeiten.

In allen Verkehrsmodi erhöht eine geringere Detaillierung der Verkehrsgraphen die Variation von Erreichbarkeitswerten. Folglich müssen vereinfachte Verkehrsgraphen in Kombination mit hochaufgelösten Raumbezugssystemen eingesetzt werden, um Fehler in der Erreichbarkeitsberechnung zu reduzieren. Beispielsweise kann die Haltestellenanbindung auf Basis von Realdistanzen zugunsten einer Luftlinienanbindung entfallen, wenn gleichzeitig ein 100-Meter-Raster zur Anwendung kommt.

Gerade im MIV und im Radverkehr führt die Klassifizierung von Erreichbarkeitswerten zu einer deutlichen Glättung der Erreichbarkeitsunterschiede. Folglich ist eine im Vergleich zum 100-Meter-Raster deutlich verringerte Auflösung des Raumbezugssystems denkbar. Die Rundung von Erreichbarkeitswerten beeinflusst die Wahl von Raumbezugssystemen jedoch nicht.

6.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Aufbau regionaler Erreichbarkeitsmodelle

Der Aufbau des regionalen Erreichbarkeitsmodells ist prinzipiell auf andere Räume übertragbar. Einschränkungen sind jedoch bei fehlenden Datengrundlagen, Softwarelizenzen und Fachkenntnissen zu erwarten. OSM stellt weltweit Geodaten in einer unterschiedlichen Qualität bereit. Mit diesen lassen sich die Verkehrsgraphen des Individualverkehrs modellieren und die wesentlichen Gelegenheiten der Daseinsvorsorge abbilden. Wesentlich eingeschränkter ist die flächendeckende Bereitstellung elektronisch lesbarer Fahrplandaten⁷². In der Regel müssen Verkehrsverbünde, Verkehrsunternehmen oder Verwaltungen als Kooperationspartner gewonnen werden, um auf elektronische Fahrplandaten zurückzugreifen. Da diese nicht immer im GTFS-Format vorliegen werden Schnittstellen zur Modellierung routingfähiger Verkehrsgraphen benötigt. Im deutschsprachigen Raum hat sich PTV Visum als der Standard im Umgang mit ÖV-Verkehrsgraphen weitgehend durchgesetzt (vgl. Abschnitt 2.3.3.4). Die hohen Lizenzkosten erschweren jedoch den Einsatz gerade in kleineren Untersuchungsgebieten. Die in dieser Arbeit verwendeten Matrizen auf Ebene von Haltestellenbereichen können

⁷² Eine gute Übersicht liefert: <https://transitfeeds.com/> (letzter Zugriff: 16.06.2019)

aber auch mit einer anderen Software berechnet werden. Die gängigste Alternative ist der ArcGIS NA. Dieser bietet aber eine geringere Performance und ermöglicht keine Berechnung der Bedienungshäufigkeit auf Start-Ziel-Relationen. Zudem erfordert die Kombination unterschiedlicher Programme zur Berechnung multimodaler Erreichbarkeiten ein umfangreiches Expertenwissen und schränkt den Einsatz von Erreichbarkeitsmodellen entsprechend ein (vgl. Abschnitt 6.4).

Erreichbarkeitsanalysen in Nahverkehrsplänen

Der Umgang mit Erreichbarkeitsanalysen in den NVP der Landkreise und kreisfreien Städte in der MRH ist mit anderen Regionen in Deutschland grundsätzlich vergleichbar. Da es sich um eine etablierte Fachplanung im Verkehrsbereich handelt, ist nicht von einem wesentlich weitergehenden Gebrauch von Erreichbarkeitsanalysen in anderen Planungszusammenhängen auszugehen. Die Analysen haben aber auch gezeigt, dass substantielle Unterschiede zwischen einzelnen NVP bestehen. Diese hängen insbesondere von ihren Bearbeitern und der Einbindung spezialisierter Planungsbüros sowie öffentlicher Forschungsprojekte ab. Die Erstellung einzelner NVP mit einem umfangreichen und strukturierten Einsatz von Erreichbarkeitsanalysen ist somit auch im übrigen Bundesgebiet anzunehmen. Da alle Gebietskörperschaften grundsätzlich vor den gleichen Herausforderungen stehen, sind relevante Abweichungen zu den NVP in der MRH wenig wahrscheinlich. Zu den Herausforderungen gehören eine begrenzte Datenverfügbarkeit, ein nicht ausreichend vorhandenes Expertenwissen sowie eine limitierte finanzielle Ausstattung. Auch der rechtliche Rahmen ist bundesweit identisch. Das Fehlen formalisierter Erreichbarkeitsstandards ist ein wesentlicher Grund für den bisher begrenzten Einsatz von Erreichbarkeitsanalysen in allen Fachplanungen (Silva et al. 2017a, S. 142ff.). Eine internationale Übertragbarkeit der Ergebnisse ist aufgrund der unterschiedlichen rechtlichen Rahmensetzungen nur begrenzt möglich. Einige in den USA durchgeführte Untersuchungen kommen jedoch ebenfalls zu dem Ergebnis, dass der Einsatz von Erreichbarkeitsindikatoren zur Ableitung von Maßnahmen bisher noch am Anfang steht (Boisjoly & El-Geneidy 2017b, S. 48; Proffitt et al. 2019, S. 187).

Auflösung von Erreichbarkeitsmodellen

Es ist davon auszugehen, dass in allen Regionen ein vergleichbarer Zusammenhang zwischen der räumlichen Auflösung, der Detaillierung von Verkehrsgraphen und der Genauigkeit von Erreichbarkeitsanalysen besteht. So resultieren die Unterschiede zwischen dem MIV, dem NMIV und dem ÖV vor allem aus den unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus und der grundsätzlichen Intermodalität von ÖV-Wegen. Nur bei eklatanten Qualitätsunterschieden der Verkehrssysteme sind Abweichungen denkbar. Mögliche Beispiele sind ein deutlich niedrigeres Geschwindigkeitsniveau des MIV aufgrund einer mangelhaften Infrastruktur oder ein wesentlich dichteres und flexibleres ÖV-System unter Einbeziehung flexibler oder autonom fahrender Angebote. Relevanter ist jedoch die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsbereiche. Zwar ist die Integration von Erreichbarkeitsanalysen in die Planungspraxis ein Leitmotiv dieser Arbeit, dennoch stellt sich auch im wissenschaftlichen Bereich immer wieder die Frage nach dem Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen. Die Arbeit liefert nicht nur Argumentationshilfen zur Vereinfachung von Erreichbarkeitsmodellen, sondern kann auch als Beleg für den Aufbau besonders detaillierter Modelle interpretiert werden. Schließlich zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die räumliche Auflösung die Genauigkeit der modellierten Interaktionen erheblich beeinflusst. Gerade im ÖV und im NMIV besteht bei einer geringen Auflösung ein großer Unterschied zu den realen Erreichbarkeitsverhältnissen. Zudem sind relative Verschiebungen innerhalb der Verkehrsmodi zugunsten des MIV zu beobachten. Sämtliche auf räumlichen Interaktionen basierende Computermodelle sind von diesen Verzerrungen betroffen. Zu nennen sind in erster Linie auf Verkehrszellen ruhende Verkehrsmodelle. Mit Hilfe der Untersuchungsergebnisse können die berechneten Raumwiderstände beispielsweise zugunsten des ÖV und NMIV angepasst werden. Auch die Nutzung zahlreicher und um die Einwohner gewichteter Anbindungen ist zu empfehlen.

6.3 Kritische Einordnung der genutzten Methode

Die Forschungsfragen in dieser Arbeit wurden mit Hilfe unterschiedlicher Methoden beantwortet. Die Ergebnisse unterliegen somit zwangsläufig einer gewissen Determinierung. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die wesentlichen Einschränkungen eingegangen.

Begrenzte Nutzbarkeit des Erreichbarkeitsmodells

Das in Kapitel 3 vorgestellte regionale Erreichbarkeitsmodell ermöglicht die kleinräumige Berechnung von Erreichbarkeiten in einem multimodalen Verkehrsgraphen. Der Modellierungsansatz basiert auch auf Erfahrungen mit anderen Erreichbarkeitsmodellen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Bei der Modellentwicklung stand die prinzipielle Machbarkeit des Modellaufbaus im Zentrum. Der Einsatz unterschiedlicher kostenintensiver Spezialsoftware und eigenprogrammierter Schnittstellen erschweren den Praxistransfer jedoch deutlich. Zukünftig muss die Übertragbarkeit solcher Modelle im Fokus stehen, zumal von Weiss et al. (2018) ein sehr ähnlicher Modellansatz entwickelt wurde. Zur Überbrückung der implementation gap sind mögliche Praxisanwender frühzeitig einzu beziehen. Vorab ist jedoch zu klären, in welchem organisatorischen Rahmen ein solches Erreichbarkeitsmodell überhaupt zum Einsatz kommen soll und welcher potenzielle Nutzen zu erwarten ist (vgl. Abschnitt 6.4). Der ausschließliche Fokus auf einen nutzbaren Modellaufbau wird auch weiterhin zur Entwicklung nicht praxisrelevanter Modellansätze führen.

Erreichbarkeiten in der breiten Praxisanwendung

Der Fokussierung auf die Modellierung von ÖV-Verkehrsgraphen ist die ausschließliche Betrachtung von NVP im Rahmen der Evaluation bestehender Praxisanwendungen geschuldet. Gleichwohl können Erreichbarkeitsanalysen auch in zahlreichen anderen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen. Darüber hinaus sind die berücksichtigten NVP ausschließlich im Gebiet der MRH angesiedelt. Eine Analyse unter Verwendung einer gewichteten Stichprobe hätte möglicherweise zu anderen Ergebnissen geführt (BMVBS 2010b, S. 51) (vgl. Abschnitt 6.2).

Verwendete Referenzauflösung

Bei der Bewertung von Aggregationsfehlern dient ein bewohntes 100-Meter-Raster als Referenzauflösung. Grundsätzlich ist aber auch die Erreichbarkeitsberechnung auf Gebäudeebene denkbar. Zumal Gebäude die Ankerpunkte von räumlichen Interaktionen darstellen. Ein solcher Ansatz wäre in der MRH zwar nicht flächendeckend umzusetzen, gleichwohl ist zu hinterfragen, ob eine noch geringere Referenzauflösung die Empfehlungen hinsichtlich des zu nutzenden Raumbezugssystems beeinflusst hätte. Außerdem zeigt sich immer wieder, dass auch das 100-Meter-Raster erhebliche Verzerrungen im Fußverkehr erzeugt (Peter 2019). Um diese These zu überprüfen hätte in einem für die MRH repräsentativen Gebietsausschnitt die Berechnung der VarK auf Gebäudeebene erfolgen können. Anschließend könnte die Sensitivität der bisher erzielten Ergebnisse genauer eingeschätzt werden.

Eine weitere Einschränkung ist die Festlegung eines Grenzwertes zur Bewertung der VarK. Zwar wird immer wieder betont, dass eine solche Begrenzung vom Untersuchungsgegenstand abhängen sollte, gleichzeitig kann die Einordnung der Ergebnisse nicht ohne eine Referenz erfolgen. Der maximale VarK von 0,1 bzw. die mittlere Abweichung der Erreichbarkeitswerte von der MRE von 10 % ist ein leicht zu interpretierender Grenzwert. Grundsätzlich wird dabei die Akzeptanz eines Genauigkeitsverlusts von 10 % unterstellt. Ein höherer oder niedrigerer Grenzwert würde zwangsläufig zu anderen Schlussfolgerungen führen. Die Effektrichtung bliebe jedoch bestehen.

6.4 Ausblick

Die in dieser Arbeit beantworteten Forschungsfragen eröffnen ihrerseits den Blick auf neue Herausforderungen. Einige dieser Herausforderungen sind Gegenstand des weiteren Forschungsbedarfes. Es existieren aber auch Problemlagen, denen nicht primär in der Wissenschaft, sondern vor allem in der Planungspraxis zu begegnen ist.

6.4.1 Weiterer Forschungsbedarf

Der weitere Forschungsbedarf bezieht sich auf den Aufbau und den Inhalt von Erreichbarkeitsmodellen. Hinzu kommt der ungeklärte Transfer von Erreichbarkeitsanalysen in Planungsentscheidungen.

Aufbau von Erreichbarkeitsmodellen

Der in dieser Arbeit präsentierte Modellansatz ermöglicht die flexible und genaue Berechnung von kleinräumigen und multimodalen Erreichbarkeiten auf regionaler Ebene. Um den Modellaufbau zu beschleunigen und die Praxisintegration zu erleichtern sind weitere offene Fragen zu klären.

Aktualisierung von Standorten und Verkehrsgraphen

Ein weiteres Problem im Umgang mit regionalen Erreichbarkeitsmodellen ist die bisher aufwendige Anpassung der Analyseergebnisse bei Änderungen an der Raumstruktur oder den Verkehrsgraphen. Mit dem vorgestellten Modellansatz können zwar unterschiedliche Szenarien verglichen werden, die schnelle Neuberechnung für einzelne Teilgebiete ist aber nicht möglich. Insofern sollte ein Verfahren entwickelt und umgesetzt werden, das die schnelle Bewertung von Modelländerungen ermöglicht.

Analysen auf Gebäudeebene

In dieser Arbeit dient ein bewohntes 100-Meter-Raster als maximal sinnvoll einsetzbare Referenzauflösung. Gleichwohl ließe sich auch für einen Teilraum der Genauigkeitsgewinn bei Verwendung eines auf Gebäudeebene aufgelösten Raumbezugssystems untersuchen. Gerade bei der Bewertung der fußläufigen Naherreichbarkeit werden mitunter auch im 100-Meter-Raster erhebliche Genauigkeitsverluste produziert.

Vereinfachung von ÖV-Graphen

Der Umgang mit den Fahrplandaten des öffentlichen Verkehrssystems ist eine der zentralen Herausforderungen in der Erreichbarkeitsmodellierung. In der Vergangenheit wurde bereits gezeigt, dass fahrplanfeine ÖV-Verkehrsgraphen eine wesentlich genauere Abbildung der Raumwiderstände im öffentlichen Verkehr ermöglichen (Salonen & Toivonen 2013). Aufgrund des anspruchsvollen Aufbaus der ÖV-Verkehrsgraphen sind mögliche Vereinfachungen bei einer gleichbleibend hohen Genauigkeit zu untersuchen. Dabei sollte der Fokus auf einem Verzicht elektronischer Fahrplandaten liegen. Freie Daten könnten den Aufbau von ÖV-Verkehrsgraphen zukünftig unterstützen.

Inhalte von Erreichbarkeitsmodellen

Fahrpreise als Widerstandsattribut

Bisher existieren nur wenige Arbeiten, die den Fahrpreis als Widerstandsattribut berücksichtigen. Im ÖV verhindert eine uneinheitliche Tarifsystematik häufig den Aufbau eines Tarifmodells. Doch auch im MIV gibt bisher nur einzelne Ansätze zur Berechnung verallgemeinerbarer Kostensätze. Mit diesen könnten beispielsweise die mit einem definierten Kostenbudget erreichbaren Arbeitsplätze oder Daseinsvorsorgeeinrichtungen ermittelt und über die einzelnen Verkehrsmodi verglichen werden. Interessant ist außerdem, in welchen Räumen die Fahrpreise und Reisezeiten in den einzelnen Verkehrsmodi korrespondieren.

Individuelle Erreichbarkeit

Zukünftig sollten Indikatoren und Verfahren entwickelt werden, die die Bewertung individueller Erreichbarkeiten ermöglichen. Eine mögliche Anwendung ist die Berücksichtigung von Öffnungszeiten in Kombination mit den notwendigen Rückfahrten im ÖPNV. Daraus ließe sich ableiten, ob sich die Erreichbarkeit im ÖPNV unter Berücksichtigung der Öffnungszeiten verringert. Zudem kann die Durchführbarkeit von Einkäufen und Freizeitaktivitäten auf Heimwegen von der Arbeit mit dem von Farber et al. (2013) entwickelten SIP bewertet werden. Im regionalen Anwendungsbereich ließen sich Gebiete identifizieren, deren Erreichbarkeitsniveau im ÖV bei Bildung von Aktivitätenketten deutlich steigt. Die Erreichbarkeit ist unter Verwendung einfacher Aktivitätenketten neu zu bewerten.

Neue Mobilitätsformen, Intermodalität, Multimodalität

Die Kombination unterschiedlicher Verkehrsmodi wird in regionalen Erreichbarkeitsmodellen bisher nur über die fußläufige Anbindung der Haltestellen abgebildet. In Großstädten sind in den letzten Jahren neue kombinierbare Mobilitätsangebote entstanden. Zu nennen sind das freifließende Carsharing, E-Scooter und Ridesharing-Angebote (u. a. Moia, Uber). Bisher ist jedoch ungeklärt, wie diese Angebote in Erreichbarkeitsmodelle integriert werden können. Dies betrifft insbesondere die Modellierung des freifließenden Car- und Ridesharings, welches sich nicht aus bereits etablierten Ansätzen ableiten lässt. Die Integration

dieser Angebote könnte mögliche Erreichbarkeitsgewinne gerade in Abgrenzung zu und in Kombination mit öffentlichen Verkehrsmitteln quantifizieren.

PRZ und die Detaillierung von Verkehrsgraphen des MIV

Untersuchungen zeigen immer wieder das strukturelle Unterschätzen von MIV-Reisezeiten im Vergleich zum ÖV und NMIV. Auch in dieser Arbeit wird deutlich, dass die Verwendung geometrischer Zentroide zu einem Überschätzen der MIV-Erreichbarkeit führt. Gerade in Städten fehlt insbesondere die genaue und verallgemeinerbare Abbildung der PRZ. Die Parksuchverkehre und die Gehzeiten von den Haltflächen zum tatsächlichen Ziel können die Gesamtreisezeit im MIV deutlich verlängern. Gleichzeitig fehlt es an Methoden zur genauen und dennoch einfachen Abschätzung dieser Zeitaufschläge. Mit Hilfe von OSM-Daten könnten beispielsweise ein regionales Parkflächenmodell abgeleitet und PRZ berechnet werden. Die Anbindung dieser Parkflächen an die Raumstruktur könnte analog zur Haltestellenanbindung im ÖV erfolgen.

Erreichbarkeitsanalysen und planerische Schlussfolgerungen

Ungeklärt ist weiterhin, welche planerischen Schlussfolgerungen aus Erreichbarkeitsanalysen überhaupt gezogen werden. Zwar werden mitunter konkrete Praxisanforderungen gesammelt und in Erreichbarkeitsanalysen übersetzt. Offen bleibt aber, wie die Ergebnisse interpretiert und konkrete Maßnahmen abgeleitet werden. Der wirkliche Nutzen von Erreichbarkeitsanalysen ist jedoch vor dem Hintergrund und der Qualität dieser Maßnahmen zu bewerten. Der Nutzen sollte zudem im Kontext der verwendeten Modelldetaillierung untersucht werden. Diese Perspektive würde die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse um eine wichtige Ebene ergänzen. Nach wie vor ist fraglich, inwiefern Genauigkeitsverluste bei der Erreichbarkeitsberechnung die planerischen Schlussfolgerungen beeinflussen. Die auftretenden und in dieser Arbeit gemessenen Aggregationsfehler beeinflussen ausschließlich die Modellgüte. Auch lässt sich eine indirekte Verbindung zur Nutzbarkeit herstellen. Zukünftig ist zu klären, inwiefern auch der Nutzen von Erreichbarkeitsinstrumenten beeinflusst wird.

6.4.2 Offene Fragen in der Planungspraxis

Ein Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die bisher nur unzureichende Integration von Erreichbarkeitsmodellen in die Planungspraxis. Diese Integration hängt jedoch nicht nur von wissenschaftlichen Vorleistungen, sondern auch von den organisatorischen und finanziellen Rahmenbedingungen ab. Wenn regionale Erreichbarkeitsmodelle in der Planungspraxis dauerhaft zur Anwendung kommen sollen, sind unterschiedliche Fragen vorab zu beantworten.

Komplexe Erreichbarkeitsmodelle und nutzerorientierte Webanwendungen

Webbasierte PSS sollen dem ungeübten GIS-Nutzer die Möglichkeit eröffnen, mit einfachen Mitteln themenspezifische Erreichbarkeitsanalysen durchzuführen. Es besteht jedoch eine Diskrepanz zwischen den sehr komplexen Erreichbarkeitsmodellen und dem Wunsch, diese in einer vereinfachten Form bereitzustellen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob Erreichbarkeitsanalysen überhaupt dezentral durch die jeweiligen Fachanwender durchgeführt werden müssen. Die dezentrale Bereitstellung von Berechnungsroutinen erfordert weiterhin den Aufbau und den Betrieb eines Erreichbarkeitsmodells. Es zeigt sich jedoch immer wieder, dass der dauerhafte Betrieb solcher Modelle von öffentlichen Einrichtungen nicht zu gewährleisten ist. Zu den Gründen gehören fehlende finanzielle Mittel und ein begrenztes Expertenwissen. Gleichzeitig bindet der Aufbau einer einfach verständlichen Webanwendung erhebliche Ressourcen. Möglich ist aber auch der zentralisierte Aufbau von Modellierungskompetenzen. Dies würde zwar Personalkapazitäten binden, die langfristige Modellverstetigung wäre aber gesichert. Auch das nötige Know-how wäre langfristig gesichert. Auf Verwaltungsebene ist zu untersuchen, wie eine solche zentrale Kompetenz zu organisieren ist und wie der Transfer in die einzelnen Fachplanungen gelingt.

Kommerzielle und freie Software

Das entwickelte regionale Erreichbarkeitsmodell basiert auf den kostenpflichtigen Softwarepaketen ArcGIS und PTV Visum. Die hohen Lizenzgebühren stellen insbesondere beim Aufbau von ÖV-Verkehrsgraphen eine erhebliche Kostenhürde dar. In der Vergangenheit wurden einige

Versuche unternommen, um Erreichbarkeitsanalysen ausschließlich mit freier Software (Open-Source-Software) durchzuführen (vgl. Abschnitt 2.3.3.4). Gerade in der ÖV-Modellierung haben sich diese Ansätze in der Planungspraxis bisher nicht bewährt. Planungsbehörden sollten zukünftig stärker hinterfragen, ob ein Verzicht auf teure Spezialsoftware in einem angemessenen Verhältnis zum intendierten Nutzen steht.

Erreichbarkeiten ›Out of the box‹

Allerdings erlauben auch kommerzielle Softwarepakete nur eingeschränkte Erreichbarkeitsberechnungen und müssen mit individuell programmierten Skripten erweitert werden. Diese dienen der Steuerung der Routings, dem Speichern und Verwalten der Ergebnisse sowie der Aufbereitung der Verkehrsgraphen und Strukturdaten (vgl. Abschnitt 3.3). Ihre Entwicklung und ihr Einsatz erfordern allerdings ein umfassendes Fachwissen. Hinzu kommt die zumeist nicht mögliche Weitergabe dieser Eigenleistungen aufgrund fehlender Programmierkenntnisse auf Seiten der potenziellen Anwender. Folglich besteht ein erheblicher Bedarf an Softwarelösungen, die umfängliche Funktionen zum Modellaufbau und zur Erreichbarkeitsberechnung bereitstellen. Auch hier ist insbesondere die Planungspraxis gefordert, solche Neuentwicklungen mit finanziellen Mitteln abzusichern.

Freie Daten und Verbesserung der Datengrundlagen

In regionalen Erreichbarkeitsmodellen ist die Bereitstellung und Aufbereitung der Datengrundlagen eine besondere Herausforderung (vgl. Abschnitt 2.2.5). Ein wesentliches Problem ist die finanzielle Überforderung der Auftraggeber bei einer weitreichenden Verwendung kostenpflichtiger Daten. Abhilfe schafft in der Regel die Verwendung freier Geodaten. Ein weiteres Problem ist die häufig mangelhafte Datenqualität. Dies betrifft öffentliche, freie und kommerzielle Daten gleichermaßen. Aufgrund des fehlenden lokalen Wissens der Modellentwickler und der eingeschränkten Umsetzbarkeit händischer Nachbearbeitungen sind neue Verfahren zu entwickeln, um für große Gebiete einen einheitlichen und kostengünstigen Datenbestand mit einer hohen Genauigkeit aufzubauen. Die öffentlichen Verwaltungen sind für die Bereitstellung vollständiger und aktueller Daten prädestiniert. Diese Bereitstellung

sollte zentral erfolgen und würde den Aufwand beim Aufbau regionaler Erreichbarkeitsmodelle erheblich reduzieren.

Ein weiteres Hindernis ist die nach wie vor eingeschränkte Verfügbarkeit elektronisch lesbarer Fahrplandaten. Zwar stellen bereits zahlreiche Verkehrsverbünde ihre Fahrplandaten zur Verfügung, für gebietsübergreifende Analysen ist dies aber nicht ausreichend. Der ÖV-Verkehrsgraph der MRH basiert auf Fahrplandaten aus sechs Datenquellen. Diese wurden manuell in ein einheitliches Modell überführt (vgl. Karte 9). Bei der vollständigen Vermeidung von Kanteneffekten wäre der Datenbedarf noch erheblich höher. Dieser lässt sich mitunter nur in konkreten Projektkontexten decken. Auch das vollständige Fehlen der notwendigen Daten ist denkbar. Zukünftig müssen Verfahren zur einheitlichen Bereitstellung von Fahrplandaten entwickelt werden. Darüber hinaus sind Ansätze zur Harmonisierung unterschiedlicher Datenquellen zu erarbeiten.

Nutzen-Kosten-Verhältnis und Erreichbarkeit

Ein mögliches neues Anwendungsfeld ist das bisher in der Praxis kaum beachtete Nutzen-Kosten-Verhältnis im Erreichbarkeitskontext (Eboli & Mazzulla 2012). Aus Perspektive von Aufgabenträgern des ÖPNV könnte ermittelt werden, welche zusätzlichen Kosten die Sicherung eines vordefinierten Erreichbarkeitsniveaus erzeugen. Andererseits könnten unterschiedliche Szenarien verglichen werden, die mögliche Erreichbarkeitsgewinne bei gegebenen zusätzlichen Kosten gegenüberstellen. Analog zum Nutzen-Kosten-Verhältnis beim Infrastrukturausbau könnten auf einer wesentlich niedrigeren Ebene unterschiedliche Angebotsveränderungen des ÖPNV im Rahmen der Nahverkehrsplanung bewertet werden.

7 Literaturverzeichnis

- Acheampong, Ransford A. & Silva, Elisabete (2015): Land use – transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions. *Journal of Transport and Land Use* 8(3), S. 11 – 38.
- Ahlmeyer, Florian & Wittowsky, Dirk (2018): Was brauchen wir in ländlichen Räumen? Erreichbarkeitsmodellierung als strategischer Ansatz der regionalen Standort- und Verkehrsplanung. *Raumforschung und Raumordnung* 76(6), S. 531–550.
- Ahrend, Christine; Schwedes, Oliver; Daubitz, Stephan; Böhme, Uwe & Hergert, Melanie (2013): Kleiner Begriffskanon der Mobilitätsforschung. *IVP-Discussion Paper* 2013(1). Berlin.
- Ahrens, Gerd-Axel; Ließke, Frank; Wittwer, Rico & Hubrich, Stefan (2009a): *Endbericht zur Verkehrserhebung »Mobilität in Städten – SrV 2008« und Auswertungen zum SrV-Städtepegel*. Technische Universität Dresden: Lehrstuhl Verkehrs- und Infrastrukturplanung.
- Ahrens, Gerd-Axel; Ließke, Frank; Wittwer, Rico & Hubrich, Stefan (2009b): *Sonderauswertung zur Verkehrserhebung, »Mobilität in Städten – SrV 2008«: SrV-Stadtgruppe: Oberzentren, 500.000 EW und mehr (ohne Berlin), Topografie: flach*. Technische Universität Dresden: Lehrstuhl Verkehrs- und Infrastrukturplanung.
- Ahrens, Gerd-Axel; Ließke, Frank; Wittwer, Rico, Hubrich, Stefan & Wittig, Sebastian (2014): *Methodenbericht zum Forschungsprojekt »Mobilität in Städten – SrV 2013«*. Technische Universität Dresden: Lehrstuhl Verkehrs- und Infrastrukturplanung.
- Ahrens, Gerd-Axel; Ließke, Frank; Wittwer, Rico; Hubrich, Stefan & Wittig, Sebastian (2015a): *Sonderauswertung zum Forschungsprojekt »Mobilität in Städten – SrV 2013«: Städtevergleich*. Technische Universität Dresden: Lehrstuhl Verkehrs- und Infrastrukturplanung.
- Ahrens, Gerd-Axel; Ließke, Frank; Wittwer, Rico; Hubrich, Stefan & Wittig, Sebastian (2015b): *Sonderauswertung zum Forschungsprojekt »Mobilität in Städten – SrV 2013«: Stadtgruppe: SrV-Städtepegel*. Technische Universität Dresden: Lehrstuhl Verkehrs- und Infrastrukturplanung.

- Altenburg, Sven; Gaffron, Philline & Gertz, Carsten (2009):
Teilhabe zu ermöglichen bedeutet Mobilität zu ermöglichen.
In, Friedrich-Ebert-Stiftung (Hrsg.): *WISO Diskurs*. Bonn.
- Ammoser, Hendrik & Hoppe, Mirko (2006): *Glossar Verkehrswesen
und Verkehrswissenschaften: Definitionen und Erläuterungen
zu Begriffen des Transport- und Nachrichtenwesens.
Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr
Nr.2/2006. Die Professoren des Insituts für Wirtschaft und
Verkehr (Hrsg.). Technische Universität Dresden: Institut für
Wirtschaft und Verkehr.*
- Anderson, Marie K.; Nielsen, Otto A. & Prato, Carlo G. (2017):
Multimodal route choice models of public transport passengers in
the Greater Copenhagen Area. *EURO Journal on Transportation
and Logistics* 6(3), S. 221–245.
- Anderson, Paul; Levinson, David M. & Parthasarathi, Pavithra (2013):
Accessibility futures. *Transactions in GIS* 17(5), S. 683–705.
- Antrim, Aaron & Barbeau, Sean J. (2013): *The Many Uses of GTFS Data
– Opening the Door to Transit and Multimodal Application.*
[https://www.locationaware.usf.edu/wp-content/uploads/2010/02/
The-Many-Uses-of-GTFS-Data-%E2%80%93-ITS-America-
submission-abbreviated.pdf](https://www.locationaware.usf.edu/wp-content/uploads/2010/02/The-Many-Uses-of-GTFS-Data-%E2%80%93-ITS-America-submission-abbreviated.pdf) (letzter Zugriff: 28.11.2019).
- ARE, Bundesamt für Raumentwicklung der Schweiz (Hrsg.)
(2010): *Erschliessung und Erreichbarkeit in der Schweiz mit dem
öffentlichen Verkehr und dem motorisierten Individualverkehr:
Grundlagenbericht*, Bern (CH).
- Arentze, T. & Timmermans, H. (2004): Multistate supernetwork
approach to modelling multi-activity, multimodal trip chains.
International Journal of Geographical Information Science 18(7),
S. 631–651.
- ARL, Akademie für Raumforschung und Landesplanung (o.J.a):
Hauptinstrumente des Planungssystems. [https://www.arl-net.de/
de/commin/deutschland-germany/14-hauptinstrumente-des-
planungssystems](https://www.arl-net.de/de/commin/deutschland-germany/14-hauptinstrumente-des-planungssystems) (letzter Zugriff: 16.04.2019).

- ARL, Akademie für Raumforschung und Landesplanung (o.J.b):
ARL-Glossar: Metropolregion, europäische.
<https://www.arl-net.de/lexica/de/metropolregion-europäische?lang=en> (letzter Zugriff: 29.11.2018).
- ARL, Akademie für Raumforschung und Landesplanung (o.J.c):
ARL-Glossar: Träger der Regionalplanung. <https://www.arl-net.de/lexica/de/träger-der-regionalplanung?lang=en>
(letzter Zugriff: 29.11.2018).
- ARL, Akademie für Raumforschung und Landesplanung (o.J.d):
Subsidiarität. [https://www.arl-net.de/de/lexica/de/subsidiarität%
C3%A4t](https://www.arl-net.de/de/lexica/de/subsidiarität%20C3%A4t) (letzter Zugriff: 03.01.2020).
- Banister, David (2008): The sustainable mobility paradigm.
Transport Policy 15(2), S. 73–80.
- Barnes, J. A. & Harary, F. (1983): Graph theory in network analysis.
Social Networks 5(2), S. 235–244.
- Bathelt, Harald & Glückler, Johannes (2012): *Wirtschaftsgeographie*. 3. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer KG (utb).
- Batty, Michael; Foot, David; Alonso, Luis; Bray, Gareth; Breheny, Michael et al. (1973): Spatial System Design and Fast Calibration of Activity Interaction-Allocation Models. *Regional Studies* 7(4), S. 351–366.
- Bäumer, Doris & Reutter, Ulrike (2005): *Demographische Entwicklung und gesellschaftliche Trends – Konsequenzen für die Verkehrsnachfrage*. ILS, Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung und Bauwesen des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). Dortmund.
- BBR, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.) (2005): Raumordnungsbericht 2005: *Kernaussagen und wichtige Abbildungen*. Bonn: 18.05.2005.
- BBR, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung & BMVBS, Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.) (2006): *Perspektiven der Raumentwicklung in Deutschland*. Bonn und Berlin.

- BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im BBR (o.J.a): *MORO – Modellvorhaben der Raumordnung*. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/MORO/moro_node.html (letzter Zugriff: 06.08.2018).
- BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im BBR (o.J.b): *Erreichbarkeitsmodell des BBSR*. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/UeberRaumbeobachtung/Komponenten/Erreichbarkeitsmodell/erreichbarkeitsmodell_node.html (letzter Zugriff: 29.11.2019).
- BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im BBR (Hrsg.) (2009): *Masterplan Daseinsvorsorge -Regionale Anpassungsstrategien. MORO-Informationen 4/2*. Bonn.
- BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im BBR (Hrsg.) (2012): *Raumordnungsbericht 2011*. Bonn.
- BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im BBR (Hrsg.) (2015): *Ökonomischer Mehrwert von Immobilien durch ÖPNV-Erschließung. BBSR-Online-Publikation 11/2015*. Bonn.
- BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im BBR (Hrsg.) (2017): *Raumordnungsbericht 2017: Daseinsvorsorge sichern*. Bonn.
- BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im BBR (Hrsg.) (2019): *Methodische Weiterentwicklungen der Erreichbarkeitsanalysen des BBSR. BBSR-Online-Publikation 09/2019*. Bonn.
- Ben-Akiva, M. & Lerman, S. (1979): *Disaggregate travel and mobility choice models and measures of accessibility*. In: Hensher, D. A. & Stopher, P. R. (Hrsg.): *Behavioural Travel Modelling*, S. 654–679. London: Croom Helm.
- Benenson, Itzhak; Martens, Karel & Birfir, Slava (2008): *PARKAGENT: An agent-based model of parking in the city. Computers, Environment and Urban Systems 32(6)*, S. 431–439.
- Benenson, Itzhak; Martens, Karel; Rofé, Yodan & Kwartler, Ariela (2011): *Public transport versus private car GIS-based estimation of accessibility applied to the Tel Aviv metropolitan area. Annals of Regional Science 47(3)*, S. 499–515.

- Benenson, Itzhak; Ben-Elia, Eran; Rofé, Yodan & Rosental, Amit (2017a): Estimation of urban transport accessibility at the spatial resolution of an individual traveler. In: Thakuriah, Piyushimita (Vonu); Tilahun, Nebiyou & Zellner, Moira (Hrsg): *Seeing Cities Through Big Data*, S. 383–404. Basel: Springer International Publishing.
- Benenson, Itzhak; Ben-Elia, Eran; Rofé, Yodan & Geyzersky, Dmitry (2017b): The benefits of a high-resolution analysis of transit accessibility. *International Journal of Geographical Information Science* 31(2), S. 213–236.
- Beria, Paolo; Debernardi, Andrea & Ferrara, Emanuele (2017): Measuring the long-distance accessibility of Italian cities. *Journal of Transport Geography* 62, S. 66–79.
- Bhat, Chandra; Handy, Susan; Kockelman, Kara; Mahmassani, Hani; Srour, Issam & Weston, Lisa (2001): *Assessment of Accessibility Measures*. Research Project 7-4938, Research Report Number 4938-3, Development Center for Transportation Research, University of Texas, Austin.
- Bhat, Chandra; Handy, Susan; Kockelman, Kara; Mahmassani, Hani; Gopal, Anand; Srour, Issam; Weston, Lisa (2002): *Development of an Urban Accessibility Index: Formulations, Aggregation, and Application*. Research Project 7-4938, Research Report Number 7 4938 1, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin.
- Bhat, Chandra; Bricka, Stacey; Mondia, Jeffrey La; Kapur, Aarti; Guo, Jessica; Sen, Sudeshna (2006): *Metropolitan Area Transit Accessibility Analysis tool*. TxDOT Project 0-5178: Measuring Access to Public Transportation Service.
- Biba, S.; Curtin, K. M. & Manca, G. (2010): A new method for determining the population with walking access to transit. *International Journal of Geographical Information Science* 24(3), S. 347–364.

- BKG, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Hrsg.) (2018): *Verwaltungsgebiete mit Einwohnerzahlen 1:1 000 000 - Stand 31.12.2017*. http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=18&gdz_user_id=0 (letzter Zugriff: 01.07.2019).
- BKG, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Hrsg.) (2019): *Geographische Gitter für Deutschland in Lambert-Projektion*. http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=31&gdz_user_id=0 (letzter Zugriff: 04.06.2019).
- BMVBS, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.) (2010a): Sicherung der Daseinsvorsorge und Zentrale-Orte-Konzepte – gesellschaftspolitische Ziele und räumliche Organisation in der Diskussion. *BMVBS-Online-Publikation 12/2010*.
- BMVBS, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.) (2010b): ÖPNV: Planungspraxis und Anforderungen älterer Menschen: FOPS 73.0331 Daseinsvorsorge und Dienstleistungsqualität in der Nahverkehrsplanung unter besonderer Berücksichtigung der Belange älterer Menschen. *BMVBS-Online-Publikation 05/2010*.
- BMVBS, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.) (2010c): Regionale Daseinsvorsorgeplanung: Ein Leitfaden zur Anpassung der öffentlichen Daseinsvorsorge an den demographischen Wandel. *Werkstatt: Praxis Heft 64*.
- BMVBS, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.) (2010d): Standardvorgaben der infrastrukturellen Daseinsvorsorge. *BMVBS-Online-Publikation 13/2010*.
- BMVBS, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.) (2012): Mobilität, Erreichbarkeit und soziale Exklusion: Fähigkeiten und Ressourcen einer ländlichen Bevölkerung für eine angemessene Versorgung und Teilhabe am öffentlichen Leben. *BMVBS-Online-Publikation 27/2012*.

- BMVI, Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2015): Sicherung der Daseinsvorsorge durch regionale Abstimmung von ÖPNV- und Versorgungsstrategien. *BMVI-Online-Publikation* Nr. 10/2015.
- BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2016): *Regionalstrategie Daseinsvorsorge: Leitfaden für die Praxis*. Berlin und Bonn.
- BMVI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2017): Daseinsvorsorge in der Regionalplanung und Möglichkeiten ihrer formellen und informellen Steuerung. *BMVI-Online-Publikation* Nr. 3/2017.
- Boarnet, Marlon G.; Giuliano, Genevieve; Hou, Yuting & Shin, Eun Jin (2017): First/last mile transit access as an equity planning issue. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 103, S. 296–310.
- Boeckh, Jürgen; Benz, Benjamin; Huster, Ernst-Ulrich & Schütte, Johannes D. (2015): Sozialpolitische Akteure und Prozesse im Mehrebenensystem. *Informationen zur politischen Bildung* 327(3), S. 54–67.
- Boisjoly, Geneviève & El-Geneidy, Ahmed M. (2016): Daily fluctuations in transit and job availability: A comparative assessment of time-sensitive accessibility measures. *Journal of Transport Geography* 52, S. 73–81.
- Boisjoly, Geneviève & El-Geneidy, Ahmed M. (2017a): How to get there? A critical assessment of accessibility objectives and indicators in metropolitan transportation plans. *Transport Policy* 55, S. 38–50.
- Boisjoly, Geneviève & El-Geneidy, Ahmed M. (2017b): The insider: A planners' perspective on accessibility. *Journal of Transport Geography* 64, S. 33–43.
- Bok, Jinjoo & Kwon, Youngsang (2016): Comparable measures of accessibility to public transport using the general transit feed specification. *Sustainability* 8(3), S. 1-13.

- Brody, Samuel D.; Highfield, Wes & Carrasco, Virginia (2004):
Measuring the collective planning capabilities of local jurisdictions to manage ecological systems in southern Florida. *Landscape and Urban Planning* 69(1), S. 33-50.
- te Brömmelstroet, Marco (2007): Desired characteristics of expert knowledge to support the integration of land use and transport planning. In: Bijdrage aan het Colloquium *Vervoersplanologisch Speurwerk* 2007. 22./23. November 2007, Antwerpen.
- te Brömmelstroet, Marco & Bertolini, Luca (2008): Developing land use and transport PSS: Meaningful information through a dialogue between modelers and planners. *Transport Policy* 15(4), S. 251–259.
- te Brömmelstroet, Marco (2010): Equip the warrior instead of manning the equipment Land use and transport planning support in the Netherlands. *Journal of Transport and Land Use* 3(1), S. 25–41.
- te Brömmelstroet, Marco; Silva, Cecília & Bertolini, Luca (Hrsg.) (2014): *Assessing usability of accessibility instruments*. Amsterdam: COST Office, European Cooperation in Science and Technology.
- te Brömmelstroet, Marco; Curtis, Carey; Larsson, Anders; Milakis, Dimitris (2016): Strengths and weaknesses of accessibility instruments in planning practice: technological rules based on experiential workshops. *European Planning Studies* 24(6), S. 1175–1196.
- te Brömmelstroet, Marco; Skou Nicolaisen, Morten; Büttner, Benjamin; Ferreira, Antonio (2017): Experiences with transportation models: An international survey of planning practices. *Transport Policy* 58, S. 10–18.
- te Brömmelstroet, Marco (2017): Towards a pragmatic research agenda for the PSS domain. Transportation Research Part A: *Policy and Practice* 104, S. 77–83.
- Burgdorf, Markus; Krischausky, Gesine & Müller-Kleißler, Renate (2015): Indikatoren zur Nahversorgung. In: BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im BBR (Hrsg.): *BBSR-Analysen KOMPAKT* 10/2015.

- Burrough, P. A. (1986): *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. 1. Auflage. Oxford (UK): Oxford University Press.
- Buthe, Bernd; Pütz, Thomas & Staats, Jens (2014): *Methodik für die Raumwirksamkeitsanalyse Bundesverkehrswegeplanung 2015*: Entwurf. Bonn und Berlin.
- Buthe, Bernd; Pütz, Thomas & Staats, Jens (2018): Verkehrsbild Deutschland: Raumordnerische Beurteilung von Verkehrsinfrastrukturprojekten. In: BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im BBR (Hrsg.): *BBSR-Analysen KOMPAKT* 04/2018.
- Büttner, Benjamin (2016): *Consequences of Sharp Increases in Mobility Costs on Accessibility: Suggestions for Individual and Public Development Strategies*. Technische Universität München, München: Chair of Urban Structure and Transport Planning.
- Büttner, Benjamin; Kinigadner, Julia; Ji, Chenyi; Wright, Benjamin & Wulfhorst, Gebhard (2018): The TUM Accessibility Atlas: Visualizing Spatial and Socioeconomic Disparities in Accessibility to Support Regional Land-Use and Transport Planning. *Networks and Spatial Economics* 18, S. 385–414.
- Carrothers, Gerald A. P. (1956): An Historical Bedew of the Gravity and Potential Concepts of Human Interaction. *Journal of the American Planning Association* 22(2), S. 94–102.
- Cervero, Robert (1997): Paradigm shift: from automobility to accessibility planning. *Urban Futures: Issues for Australian cities* 22, S. 9–20.
- Chaniotakis, Emmanouil & Pel, Adam J. (2015): Drivers' parking location choice under uncertain parking availability and search times: A stated preference experiment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 82, S. 228–239.
- Chen, Yan Yan; Wei, Pan Yi; Lai, Jian Hui; Feng, Guo Chen; Li, Xin & Gong, Yi (2016): An Evaluating Method of Public Transit Accessibility for Urban Areas Based on GIS. *Procedia Engineering* 137. S. 132–140.

- Cheng, Shaowu; Xie, Bing; Bie, Yiming; Zhang, Yaping & Zhang, Shen (2018): Measure dynamic individual spatial-temporal accessibility by public transit: Integrating time-table and passenger departure time. *Journal of Transport Geography* 66, S. 235–247.
- Chowdhury, Subeh (2016): Users' willingness to ride an integrated public-transport service: A literature review. *Transport Policy* 48, S. 183–195.
- Chowdhury, Subeh; Ceder, Avishai & Veltz, Bruno (2014): Measuring Public-Transport Network Connectivity Using Google Transit with Comparison across Cities. *Journal of Public Transportation* 17(4), S. 76–92.
- Condeço Melhorado, Ana Margarida; Demirel, Hande; Kompil, Mert; Navajas, Elena & Christidis, Panayotis (2016): The impact of measuring internal travel distances on self-potentials and accessibility. *European Journal of Transport and Infra structure Research* 16(2), S. 300–318.
- Conway, Matt (2012): Measuring Urban Mobility and Accessibility Using OpenTripPlanner Analyst. *California Geographic Society annual conference*. <http://www.indicatrix.org/cgs2012/> (letzter Zugriff: 15.08.2018).
- Curl, Angela; Nelson, John D. & Anable, Jillian (2011): Does accessibility planning address what matters? A review of current practice and practitioner perspectives. *Research in Transportation Business and Management* 2, S. 3–11.
- Curl, Angela; Nelson, John D. & Anable, Jillian (2015): Same question, different answer: A comparison of GIS-based journey time accessibility with self-reported measures from the National Travel Survey in England. *Computers, Environment and Urban Systems* 49, S. 86–97.
- Current, John R. & Schilling, David A. (1987): Elimination of Source A and B Errors in p-Median Location Problems. *Geographical Analysis* 19(2), S. 95–110.

- Curtis, Carey & Scheurer, Jan (2017): Performance measures for public transport accessibility: Learning from international practice. *Journal of Transport and Land Use* 10(1), S. 93–118.
- Curtis, Carey & Scheurer, Jan (2010): Planning for sustainable accessibility: Developing tools to aid discussion and decision-making. *Progress in Planning* 74(2), S. 53–106.
- Dalvi, M. Quasim & Martin, K. M. (1976): The measurement of accessibility: Some preliminary results. *Transportation* 5(1), S. 17–42.
- Daniels, Rhonda & Mulley, Corinne (2013): Explaining walking distance to public transport: The dominance of public transport supply. *Journal of Transport and Land Use* 6(2), S. 5–20.
- Dark, Shawna J. & Bram, Danielle (2007): The modifiable areal unit problem (MAUP) in physical geography. *Progress in Physical Geography* 31(5), S. 471–479.
- Daubitz, Stephan (2011): Mobilität und Armut - Die soziale Frage im Verkehr. In: Schwedes, Oliver (Hrsg.): *Verkehrspolitik: Eine interdisziplinäre Einführung*. S. 181–193. Wiesbaden: VS Verlag.
- Deffner, Jutta (2011): Fuß- und Radverkehr – Flexibel, modern und postfossil. In: Schwedes, Oliver (Hrsg.): *Verkehrspolitik: Eine interdisziplinäre Einführung*. S. 361–387. Wiesbaden: VS Verlag.
- Department for Transport (Hrsg.) (2004): *Guidance on Accessibility Planning in Local Transport Plans*. London.
- Department for Transport (Hrsg.) (2014): *Accessibility Statistics: Guidance Version 1*. London.
- Destatis, Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2015): *Zensus 2011: Methoden und Verfahren*. Wiesbaden.
- Destatis, Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2018): *Ergebnisse des Zensus 2011 zum Download – erweitert*. <https://www.zensus2011.de/DE/Home/Aktuelles/DemografischeGrunddaten.html> (letzter Zugriff: 06.01.2020).
- Deußner, Reinhold (1996): Neukonzeption der Erreichbarkeitsmodelle Öffentlicher und Individualverkehr. In: Schrenk, Manfred (Hrsg.): *Computergestützte Raumplanung: Beiträge zum Symposium CORP '96*. Wien.

- Deutscher Bundestag (2007): Bericht des Parlamentarischen Beirats für nachhaltige Entwicklung »Demographischer Wandel und nachhaltige Infrastrukturplanung«. *Drucksache* 16/4900 vom 29.03.2007. Deutscher Bundestag, 16. Wahlperiode, Berlin.
- Dijkstra, E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1(1), S. 269–271.
- DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (2002): DIN EN 13816: *Definition, Festlegung von Leistungszielen und Messung der Servicequalität*. Berlin.
- Djurhuus, Sune; Sten Hansen, Henning; Aadahl, Mette & Glümer, Charlotte (2016): Building a multimodal network and determining individual accessibility by public transportation. *Environment and Planning B: Planning and Design* 43(1), S. 210–227.
- Dubé, Jean; Thériault, Marius & Des Rosiers, François (2013): Commuter rail accessibility and house values: The case of the Montreal South Shore, Canada, 1992-2009. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 54, S. 49–66.
- Eboli, Laura & Mazzulla, Gabriella (2012): Performance indicators for an objective measure of public transport service quality. *European Transport* (51), S. 1–21.
- Einig, Klaus (2015): Gewährleisten Zentrale-Orte-Konzepte gleichwertige Lebensverhältnisse bei der Daseinsvorsorge? *Informationen zur Raumentwicklung* (1), S. 45–56.
- El-Geneidy, Ahmed; Levinson, David M.; Diab, Ehab; Boisjoly, Genevieve; Verbich, David & Loong, Charis (2016): The cost of equity: Assessing transit accessibility and social disparity using total travel cost. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 91, S. 302–316.
- El-Geneidy, Ahmed M & Levinson, David M. (2006): *Access to Destinations: Development of Accessibility Measures*. Access to Destinations Study. MN/RC-2006-16. Department of Civil Engineering, University of Minnesota. Minneapolis (USA).

- ESPON, European Spatial Planning Observaion Network (2006):
The Modifiable Areas Unit Problem: Scientific Support Project 3.4.3.
Luxemburg. <https://www.espon.eu/programme/projects/espon-2006/studies-and-scientific-support-projects/modifiable-areas-unit-problem> (letzter Zugriff: 13.04.2019).
- Farber, Steven; Neutens, Tijs; Miller, Harvey J. & Li, Xiao (2013):
The Social Interaction Potential of Metropolitan Regions: A Time-
Geographic Measurement Approach Using Joint Accessibility.
Annals of the Association of American Geographers 103(3),
S. 483-504.
- Farber, Steven & Fu, Liwei (2017): Dynamic public transit accessibility
using travel time cubes: Comparing the effects of infrastructure
(dis)investments over time. *Computers, Environment and
Urban Systems* 62, S. 30-40.
- Farber, Steven; Morang, Melinda Z. & Widener, Michael J. (2014):
Temporal variability in transit-based accessibility to supermarkets.
Applied Geography 53, S. 149-159.
- Farber, Steven; Ritter, Benjamin & Fu, Liwei (2016): Space-time
mismatch between transit service and observed travel patterns
in the Wasatch Front, Utah: A social equity perspective.
Travel Behaviour and Society 4, S. 40-48.
- Fayyaz, K. & Liu, X. (2016): Development of Open Source Tool using
General Transit Feed Specification (GTFS) for Transit
Spatiotemporal Connectivity Analysis. In: *ITE Western District
Meeting 2016*, 10.-13.07.2016. Albuquerque (USA).
- Fayyaz, S. Kiavash; Liu, Xiaoyue Cathy & Porter, Richard J. (2017):
Dynamic transit accessibility and transit gap causality analysis.
Journal of Transport Geography 59, S. 27-39.
- FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
(Hrsg.) (2001): *Leitfaden für Verkehrsplanungen.*
FGSV-Nr. 161. Köln: FGSV-Verlag.
- FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.)
(2008): *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung*
RIN R1. FGSV-Nr. 121. Köln: FGSV-Verlag.

- FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) (2010): *Empfehlungen für Planung und Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs*. FGSV-Nr. 050. Köln: FGSV-Verlag.
- FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) (2012): *Begriffsbestimmungen – Teil: Verkehrsplanung, Straßentwurf und Straßenbetrieb*. FGSV-Nr. 220. Köln: FGSV-Verlag.
- FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) (2013): *Hinweise zur Verkehrsentwicklungsplanung*. FGSV-Nr. 162. Köln: FGSV-Verlag.
- FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) (2014): *Hinweise zur Nahmobilität: Strategien zur Stärkung des nichtmotorisierten Verkehrs auf Quartiers- und Ortsteilebene*. FGSV-Nr. 163. Köln: FGSV-Verlag.
- FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) (2017): *Multi- und Intermodalität: Hinweise zur Umsetzung und Wirkung von Maßnahmen im Personenverkehr: Teilpapier 1: Definitionen*. FGSV-Nr. 051. Köln: FGSV-Verlag.
- FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) (2018): *Hinweise zur Anwendung der RIN (W1)*. 1. Auflage. FGSV-Nr. 121/1. Köln: FGSV-Verlag.
- FHH, Freie und Hansestadt Hamburg (Hrsg.) (2014): *Hamburger Leitlinien für den Einzelhandel: Ziele und Ansiedlungsgrundsätze*. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt. Beschluss der Senatskommission für Stadtentwicklung und Wohnungsbau vom 23.01.2014. Hamburg.
- Ford, Alistair; Barr, Stuart; Dawson, Richard & James, Philip (2015): *Transport Accessibility Analysis Using GIS: Assessing Sustainable Transport in London*. ISPRS International Journal of Geo-Information 4(1), S. 124–149.
- Fortin, Philippe; Morency, Catherine & Trépanier, Martin (2016): *Innovative GTFS Data Application for Transit Network Analysis Using a Graph-Oriented Method*. *Journal of Public Transportation* 19(4), S. 18–37.
- Fotheringham, A. Stewart (1989): *Scale-independent spatial analysis*. In: Goodchild, M. & Gopal, S. (Hrsg.): *The accuracy of spatial databases*. S. 221–228. London: Taylor & Francis.

- Fransen, Koos; Neutens, Tijs; Farber, Steven; De Maeyer, Philippe; Deruyter, Greet & Witlox, Frank (2015): Identifying public transport gaps using time-dependent accessibility levels. *Journal of Transport Geography* 48, S. 176–187.
- Friedrich, Markus & Hartl, Maximilian (2015): *Expedition oder Kurztrip: Verkehrliche Erreichbarkeit ausgewählter Standorte: Methodenbericht und Bewertung*. IHK, Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart (Hrsg.). Stuttgart.
- Friedrich, Markus; Siedentop, Stefan; Wittowsky, Dirk; Rönsch, Stefanie & Ahlmeyer, Florian (2016): *Erreichbarkeitssicherung im ländlichen Raum: Lessons Learned aus Calw*. UR-Verbandtreffen am 12.04.2016 in Dortmund.
- Friedwagner, Andreas; Langthaler, Thomas; Ortner, Simon; Rehl, Karl & Uschnigg, Michael (2014): *Anwendungsbeispiele für länderübergreifende Erreichbarkeitsmodelle*. In: Strobl, J.; Blaschke, T.; Griesebner, G. & Zagel, B. (Hrsg.): *Angewandte Geoinformatik 2014: Beiträge zum 26. AGIT-Symposium Salzburg*. S. 608–613. Berlin: VDE Verlag GmbH.
- Geertman, Stan C. M. & Ritsema van Eck, Jan R. (1995): GIS and models of accessibility potential: an application in planning. *International journal of geographical information systems* 9(1), S. 67–80.
- Gertz, Carsten; Maaß, Jacqueline & Guimarães, Thiago (2015): Auswirkungen von steigenden Energiepreisen auf die Mobilität und Landnutzung in der Metropolregion Hamburg: Ergebnisse des Projekts €LAN - Energiepreisentwicklung und Landnutzung Harburger. In: Gertz, Carsten & Flämig, Heike (Hrsg.): *Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik* Bd. 13. Hamburg: MV-Verlag.
- Geschwinder, Klaus (2008): Verankerung von wirtschaftlichen Indikatoren und Grenzwerten im Nahverkehrsplan. In: Bracher, T.; Dziekan, K.; Gies, J.; Huber, F.; Kiepe, F.; Reutter, U.; Saary, K. & Schwedes, O. (Hrsg.): *Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung: Strategien, Konzepte und Maßnahmen für eine integrierte und nachhaltige Mobilität* Kapitel 3.2.7.2. Berlin und Offenbach: Herbert Wichmann Verlag / VDE Verlag GmbH.

- Geurs, Karst T. & Ritsema van Eck, Jan (2001): *Accessibility measures: review and applications: Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impacts*. RIVM report 408505 006. Utrecht.
- Geurs, Karst T. & van Wee, Bert (2004): Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography* 12(2004), S. 127–140.
- Geurs, Karst T.; De Montis, Andrea & Reggiani, Aura (2015): Recent advances and applications in accessibility modelling. *Computers, Environment and Urban Systems* 49, S. 82–85.
- Geurs, Karst T. (2018): Transport Planning With Accessibility Indices in the Netherlands. In: OECD, International Transport Forum (Hrsg.): *Discussion Paper*. Paris.
- Google (2018): *Directions API*. <https://developers.google.com/maps/documentation/directions/start> (letzter Zugriff: 09.08.2018).
- Gorter, Marc; Rönnau, Hans Joachim; Plath, Bernd & Werner, Jan (2001): Weiche Angebotsmerkmale im ÖPNV: Ihre Bedeutung für Ausschreibung und Vertragsgestaltung. *Der Nahverkehr* 19(6), S. 14–19.
- Grengs, Joe; Levine, Jonathan; Qing Shen & Qingyun Shen (2010): Intermetropolitan Comparison of Transportation Accessibility: Sorting Out Mobility and Proximity in San Francisco and Washington, D.C. *Journal of Planning Education and Research* 29(4), S. 427–443.
- Grengs, Joe (2010): Job accessibility and the modal mismatch in Detroit. *Journal of Transport Geography* 18(1), S. 42–54.
- Gulhan, Gorkem; Ceylan, Halim Huseyin; Baskan, Ozgur & Ceylan, Halim Huseyin (2014): Using Potential Accessibility Measure for Urban Public Transportation Planning : a Case Study of Denizli; Turkey. *Traffic and Transportation* 26(2), S. 129–137.
- Hägerstrand, Torsten (1970): What about people in regional science? *Papers in Regional Science* 24(1), S. 7–24.
- Hägerstrand, Torsten (1989): Reflections on »what about people in regional science?« *Papers of the Regional Science Association* 66(1), S. 1–6.

- Halden, Derek (2009): 10 years of Accessibility Planning in the UK - What has been achieved? *Proceedings of the European Transport Conference 2009* in Amsterdam.
- Halden, Derek (2014): Shaping the Future: Case Studies in UK Accessibility Planning. *Transportation Research Procedia* 1. S. 284–292.
- Hall, Peter & Tewdwr-Jones, Mark (2011): *Urban and Regional Planning*. 5. Auflage. London und New York: Routledge Taylor & Francis.
- Handy, Susan L. & Niemeier, Debbie A. (1997): Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives. *Environment and Planning A* 29(7), S. 1175–1194.
- Hansen, Walter G. (1959): How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners* 25(2), S. 73–76.
- Harris, Britton (1989): Beyond geographic information systems. *Journal of the American Planning Association* 55(1), S. 85–90.
- Harris, Britton & Batty, Michael (1993): Locational Models, Geographic Information and Planning Support Systems. *Journal of Planning Education and Research* 12(3), S. 184–198.
- Hellmanns, Julia & Klein, Ulrike (2015): Die Auswirkungen des demographischen Wandels auf die Attraktivität des Lebens- und Wirtschaftsraumes. In: Strobl, J.; Blaschke, T.; Griesebner, G. & Zigel, B. (Hrsg.): *Journal für Angewandte Geoinformatik* 2014: Beiträge zum 26. AGIT-Symposium Salzburg. S. 38–43. Berlin: VDE Verlag GmbH.
- Herst, Josh (2010): Introducing Transit Score and Commute Reports. In: Walk Score (Hrsg.): Walk Score Blog. http://blog.walkscore.com/2010/08/transit-score-and-commute-reports/#.Wl8_1nkiG7o (letzter Zugriff: 17.01.2018).
- Hess, Daniel Baldwin (2005): *Access to employment for adults in poverty in the Buffalo-Niagara region*. *Urban Studies* 42(7), S. 1177–1200.
- Hesse, Claudia; Bohne, Simone; Evangelinos, Christos & Püschel, Ronny (2012): *Erreichbarkeitsmessung: Theoretische Konzepte und empirische Anwendungen*. Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr 2012(3). Technische Universität Dresden.

- Hewko, Jared; Smoyer-Tomic, Karen E. & Hodgson, M. John (2002): Measuring neighbourhood spatial accessibility to urban amenities: Does aggregation error matter? *Environment and Planning A* 34(7), S. 1185–1206.
- Hiess, Helmut (2017): *Entwicklung eines Umsetzungskonzeptes für österreichweite ÖV-Güteklassen: Abschlussbericht*. ÖROK, Österreichischen Raumordnungskonferenz (Hrsg.), Wien.
- Higgs, Gary (2004): A Literature Review of the Use of GIS-Based Measures of Access to Health Care Services. *Health Services & Outcomes Research Methodology* 5, S. 119–139.
- Hillsman, Edward L. & Rhoda, Richard (1978): Errors in measuring distances from populations to service centers. *The Annals of Regional Science* 12(3), S. 74–88.
- Holz-Rau, Christian (2009): Raum, Mobilität und Erreichbarkeit – (Infra-)Strukturen umgestalten? *Informationen zur Raumentwicklung* (12), S. 797–804.
- Holz-Rau, Christian; Krummheuer, Florian & Günther, Stephan (2009): Der Nahverkehrsplan als Instrument der kommunalen ÖPNV-Planung. In: Bracher, T.; Dziekan, K.; Gies, J.; Huber, F.; Kiepe, F.; Reutter, U.; Saary, K. & Schwedes, O. (Hrsg.): *Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung: Strategien, Konzepte und Maßnahmen für eine integrierte und nachhaltige Mobilität* Kapitel 3.2.7.3. Berlin und Offenbach: Herbert Wichmann Verlag / VDE Verlag GmbH.
- Hull, Angela; Silva, Cecília & Bertolini, Luca (Hrsg.) (2012): *Accessibility Instruments for Planning Practice*. Amsterdam: COST Office, European Cooperation in Science and Technology.
- Hülsmann, Wulf & König, Peggy (2017): *Planungsebenen, Planungsräume – Stufen der räumlichen Planung*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/planungsinstrumente/planungsebenen-planungsräume-stufen-der#textpart-1> (letzter Zugriff: 29.11.2019).
- IGES Institut GmbH (2018): *4. Regionaler Nahverkehrsplan der Hansestadt Lübeck 2019 – 2023 (4. RNVP)*. Hansestadt Lübeck (Hrsg.). Berlin.

- Inayathusein, Aliasgar & Cooper, Simon (2018): London's Accessibility Indicators: Strengths, Weaknesses, Challenges. In: OECD, International Transport Forum (Hrsg.): *Discussion Paper*. Paris.
- infas, Institut für angewandte Sozialwissenschaft; DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; IVT, IVT Research GmbH & infas 360 (2019): *Mobilität in Deutschland - MiD: Ergebnisbericht*. Im Auftrag des BMVI. Bonn.
- infas, Institut für angewandte Sozialwissenschaft; DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; IVT, IVT Research GmbH & infas 360 (2018a): *Mobilität in Deutschland: Kurzreport*. Im Auftrag des BMVI. Bonn.
- infas, Institut für angewandte Sozialwissenschaft; DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; IVT, IVT Research GmbH & infas 360 (2018b): *Mobilität in Deutschland: Kurzreport: Hamburg und Metropolregion*. Im Auftrag des BMVI, des HVV, der FHH und der MRH. Bonn.
- infas, Institut für angewandte Sozialwissenschaft & DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2010): *Mobilität in Deutschland 2008: Nutzerhandbuch*. Im Auftrag des BMVBS. Bonn.
- Ingram, D. R. (1971): The Concept of Accessibility: A Search for an Operational Form. *Regional Studies* 5(2), S. 101–107.
- Irwin, Elena G.; Bockstael, Nancy E. & Cho, Huyn Jin (2006): Measuring and modeling urban sprawl: Data, scale and spatial dependencies. In: 53rd Annual North American Regional Science Association Meetings of the Regional Science Association International. Toronto.
- ITP, Intraplan Consult GmbH & VWI, Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH (2006): *Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des ÖPNV und Folgekostenrechnung Version 2006*. Im Auftrag des BMVBS. Bonn.
- Jacobs-Crisioni, Chris; Rietveld, Piet & Koomen, Eric (2014): The impact of spatial aggregation on urban development analyses. *Applied Geography* 47, S. 46–56.

- Jacobson, Aleisha (2010): Walk Score® launches Transit Score™ and commute reports: New tools help consumers understand their transportation options. *PRNewswire* 16.08.2010. Seattle.
- Jelinski, Dennis E. & Wu, Jianguo (1996): The modifiable areal unit problem and implications for landscape ecology. *Landscape Ecology* 11(3), S. 129–140.
- Judge, E. J. (1974): *The concept of accessibility: some operational problems*. Leeds (UK): Polytechnic and the University of Leeds.
- Kain, John F. (1968): Housing Segregation, Negro Employment, and Metropolitan Decentralization. *The Quarterly Journal of Economics* 82(2), S. 175–197.
- Kaplan, Sigal; Popoks, Dmitrijs; Prato, Carlo Giacomo & Ceder, A. (2014): Using connectivity for measuring equity in transit provision. *Journal of Transport Geography* 37, S. 82–92.
- Karner, Alex (2018): Assessing public transit service equity using route-level accessibility measures and public data. *Journal of Transport Geography* 67, S. 24–32.
- Karner, Alex & Niemeier, Deb (2013): Civil rights guidance and equity analysis methods for regional transportation plans: A critical review of literature and practice. *Journal of Transport Geography* 33, S. 126–134.
- Kawabata, Mizuki & Shen, Qing (2006): Job accessibility as an indicator of auto-oriented urban structure: A comparison of Boston and Los Angeles with Tokyo. *Environment and Planning B: Planning and Design* 33(1), S. 115–130.
- KGeo, Landesamt für innere Verwaltung, Koordinierungsstelle für Geoinformationswesen in Mecklenburg-Vorpommern (2016): *GeoPortal.MV*. <https://www.geoportal-mv.de/portal/Sonstiges/Kontakt> (letzter Zugriff am 15.03.2018).
- Kilby, Kelly & Smith, Noel (2012): *Accessibility Planning Policy: Evaluation and Future: Final Report*. London und Chicago.

- Knieling, Jörg (2002): Kooperation und Netzwerke als Strategien regionaler Nahverkehrsplanung. In: Bracher, T.; Dziekan, K.; Gies, J.; Huber, F.; Kiepe, F.; Reutter, U.; Saary, K. & Schwedes, O. (Hrsg.): *Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung: Strategien, Konzepte und Maßnahmen für eine integrierte und nachhaltige Mobilität* Kapitel 3.2.7.1. Berlin und Offenbach: Herbert Wichmann Verlag / VDE Verlag GmbH.
- Knorr, Andreas (2005): Gemeinwohl und Daseinsvorsorge in der Infrastruktur. In: Hartwig, Karl-Hans & Knorr, Andreas (Hrsg.): *Neuere Entwicklungen in der Infrastrukturpolitik: Beiträge aus dem Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster* Heft 157. S. 31–53. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Koerner, Joseph Leo (2017): Die <<Stelle>> in der unbegrenzten Großstadt. In: Fogarassy, A. (Hrsg.): *Otto Wagner: die Wiener Stadtbahn*. S. 37–43. Berlin: Hatje Cantz.
- Kok, Kasper; Farrow, Andrew; Veldkamp, A. & Verburg, Peter H. (2001): A method and application of multiscale validation in spatial land use models. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85, S. 223–238.
- Komornicki, Tomasz; Rosik, Piotr; Stepniak, Marcin; Śleszyński, Przemysław; Goliszek, Sławomir; Pomianowski, Wojciech & Kowalczyk, Karol (2018): *Evaluation and Monitoring of Accessibility Changes in Poland: Using the MAI Indicator*. IGSO PAS, MED, Warschau.
- Koopmans, Carl; Groot, Wim; Warffemius, Pim; Annema, Jan Anne & Hoogendoorn-Lanser, Sascha (2013): Measuring generalised transport costs as an indicator of accessibility changes over time. *Transport Policy* 29, S. 154–159.
- Koppen, Georg-Friedrich; Greis, Maria & Martin, Michael (2006): *Verkehrsentwicklungsplan*. Beschluss der Vollversammlung des Stadtrats vom 15. März 2006. Landeshauptstadt München, Referat für Stadtplanung und Bauordnung (Hrsg.). München.
- Kreis Ostholstein (Hrsg.) (2014): *Dritter Regionaler Nahverkehrsplan*. Eutin.

- Kreis Pinneberg (Hrsg.) & SVG, Südholstein Verkehrsservice-gesellschaft mbH (2016): Vierter Regionaler Nahverkehrsplan Kreis Pinneberg 2015-2019. Elmshorn.
- Krizek, Kevin J; El-Geneidy, Ahmed & Iacono, Michael (2007): Access to Destinations: Refining Methods for Calculating Non-Auto Travel Times. *Access to Destinations Study 2*. MN/RC-2007-24 Transit.
- Kujala, Rainer; Weckström, Christoffer; Mladenovic, Miloš N. & Saramäki, Jari (2018): Travel times and transfers in public transport: Comprehensive accessibility analysis based on Pareto-optimal journeys. *Computers, Environment and Urban Systems* 67, S. 41–54.
- Küpper, Patrick & Peters, Jan Cornelius (2019): Entwicklung regionaler Disparitäten hinsichtlich Wirtschaftskraft, sozialer Lage sowie Daseinsvorsorge und Infrastruktur in Deutschland und seinen ländlichen Räumen. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hrsg.). *Thünen Report* 66. Braunschweig.
- Kwan, Mei-Po (1999): Gender and individual access to urban opportunities: A study using space–time measures. *Professional Geographer* 51(2), S. 211–227.
- Kwan, Mei-Po (1998): Space-Time and Integral Measures of Individual Accessibility: A Comparative Analysis Using a Point-based Framework. *GeoGraphical Analysis* 30(3), S. 191–216.
- Kwan, Mei-Po & Weber, Joe (2003): Individual accessibility revisited: Implications for geographical analysis in the twenty-first century. *Geographical Analysis* 35(4), S. 341–353.
- Kwan, Mei-Po & Weber, Joe (2008): Scale and accessibility: Implications for the analysis of land use-travel interaction. *Applied Geography* 28(2), S. 110–123.
- Kwok, Rebecca C. W. & Yeh, Anthony G. O. (2004): The use of modal accessibility gap as an indicator for sustainable transport development. *Environment and Planning A* 36(5), S. 921–936.
- Lättman, Katrin; Olsson, Lars E. & Friman, Margareta (2018): A new approach to accessibility – Examining perceived accessibility in contrast to objectively measured accessibility in daily travel. *Research in Transportation Economics* 69, S. 501–511.

- Lee, Jinhyung & Miller, Harvey J. (2018): Measuring the impacts of new public transit services on space-time accessibility: An analysis of transit system redesign and new bus rapid transit in Columbus, Ohio, USA. *Applied Geography* 93, S. 47–63.
- Lei, Ting L. & Church, Richard L. (2010): Mapping transit-based access: integrating GIS, routes and schedules. *International Journal of Geographical Information Science* 24(2), S. 283–304.
- Lenntorp, Bo (1976): Paths in space-time environments: A time-geographic study of movement possibilities of individuals. *Environment and Planning A* 9, S. 961–972.
- Leßmann, Christian (2005): Regionale Disparitäten in Deutschland und ausgesuchten OECD-Staaten im Vergleich. *ifo Dresden berichtet* 3/2005, S. 25–33. Dresden.
- Levine, Jonathan; Merlin, Louis & Grengs, Joe (2017): Project-level accessibility analysis for land-use planning. *Transport Policy* 53, S. 107–119.
- Liao, Feixiong; Arentze, Theo & Timmermans, Harry (2013a): Incorporating space-time constraints and activity-travel time profiles in a multi-state supernetwork approach to individual activity-travel scheduling. *Transportation Research Part B: Methodological* 55, S. 41–58.
- Liao, Feixiong; Arentze, Theo & Timmermans, Harry (2013b): Multi-state supernetwork framework for the two-person joint travel problem. *Transportation* 40(4), S. 813–826.
- Liao, Feixiong; Arentze, Theo & Timmermans, Harry (2014): Multi-state supernetworks: recent progress and prospects. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 1(1), S. 13–27.
- Liao, Feixiong & van Wee, Bert (2017): Accessibility measures for robustness of the transport system. *Transportation* 44(5), S. 1213–1233.
- Liu, Suxia & Zhu, Xuan (2004): Accessibility Analyst: An integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning. *Environment and Planning B: Planning and Design* 31(1), S. 105–124.

- Lohse, Dieter (1997): Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen unter Beachtung von Nebenbedingungen einschließlich Parameterschätzung (Verkehrsnachfragemodellierung: Erzeugung, Verteilung, Aufteilung). *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr* Heft 5/1997. Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Technische Universität Dresden.
- Löwa, Sonja (2017): Praktische Erfahrungen beim Einsatz von Verkehrsmodellen in Kommunen. *ETCL Working Paper 47*. Institut für Verkehrsplanung und Logistik (Hrsg.), Technische Universität Hamburg.
- Madelin, Malika; Grasland, Claude; Mathian, Hélène; Sanders, Léna & Vincent, Jean-Marc (2009): Das »MAUP«: Modifiable Areal Unit - Problem oder Fortschritt? *Informationen zur Raumentwicklung* 10/11, S. 645–660.
- Manout, Ouassim; Bonnel, Patrick & Bouzouina, Louafi (2018): Transit accessibility: A new definition of transit connectors. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 113, S. 88–100.
- Maretzke, Steffen (2010): Wo stehen die ostdeutschen Regionen heute?: Das Nebeneinander von Wachstumsprozessen und Potenzialverlusten. *Informationen zur Raumentwicklung* Heft 10/11.2010, S. 809–822.
- Martens, Karel (2014): Accessibility and Potential Mobility as a Guide for Policy Action. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* 2499, S. 18–28.
- Martin, D.; Wrigley, H.; Barnett, S. & Roderick, P. (2002): Increasing the sophistication of access measurement in a rural healthcare study. *Health and Place* 8(1), S. 3–13.
- Martin, David J.; Jordan, Hannah & Roderick, Paul (2008): Taking the bus: Incorporating public transport timetable data into health care accessibility modelling. *Environment and Planning A* 40(10), S. 2510–2525.
- Masser, Ian & Wegener, Michael (2016): Brave New GIS Worlds Revisited. *Environment and Planning B: Planning and Design* 43(6), S. 1155–1161.

- Matthes, Gesa; Pusch, Charlotte; Nitsios, Gesine; Welsch, Janina & Garde, Jan (2019): Der digitale Daseinsvorsorgeatlas: Ein Überblick. In: Matthes, Gesa (Hrsg.): *Urban Rural SOLUTIONS: Innovationen im regionalen Daseinsvorsorgemanagement durch Unterstützung von interkommunalen Kooperationen*. S. 165-186. Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik, Band 20. Münster: Münsterscher Verlag für Wissenschaft.
- Mavoa, Suzanne; Witten, Karen; McCreanor, Tim & O'Sullivan, David (2012): GIS based destination accessibility via public transit and walking in Auckland, New Zealand. *Journal of Transport Geography* 20(1), S. 15-22.
- McHugh, Bibiana & TriMet (2011): The OpenTripPlanner Project. TriMet. Metro RTO Grant. Portland (USA).
- MEID MV, Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung des Landes Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.) (2018): *Integrierter Landesverkehrsplan Mecklenburg-Vorpommern (ILVP M-V)*. Schwerin.
- Miller, Eric J. (2018): Accessibility: measurement and application in transportation planning. *Transport Reviews* 38(5), S. 551-555.
- Miller, Harvey (2007): Place-Based versus People-Based Geographic Information Science. *Geography Compass* 1(3), S. 503-535.
- ML, Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (o.J.): *Regionalplanung*. https://www.ml.niedersachsen.de/startseite/themen/raumordnung_landesplanung/regionalplanung/Regionale+Raumordnungsprogramme+Niedersachsen-4973.html (letzter Zugriff am 30.11.2019).
- Moeckel, Rolf & Donnelly, Rick (2015): Gradual rasterization: redefining spatial resolution in transport modelling. *Environment and Planning B: Planning and Design* 42(5), S. 888-903.
- Moeckel, Rolf; Chou, Ana T. Moreno; Garcia, Carlos Llorca & Okrah, Matthew Bediako (2018): Trends in integrated land-use/transport modeling: An evaluation of the state of the art. *Journal of Transport and Land Use*, 11(1), S. 463-476.

- Molloy, Joseph & Moeckel, Rolf (2017): Automated design of gradual zone systems. *Open Geospatial Data, Software and Standards* 2, S. 1–10.
- Moniruzzaman, Md & Páez, Antonio (2012): Accessibility to transit, by transit, and mode share: application of a logistic model with spatial filters. *Journal of Transport Geography* 24, S. 198–205.
- MRH, Metropolregion Hamburg (o.J.a): *Erreichbarkeitsportal*. http://geoportal.metropolregion.hamburg.de/mrh_erreichtbarkeitsanalysen/# (letzter Zugriff: 29.11.2019).
- MRH, Metropolregion Hamburg (o.J.b): *Geoportal MRH*. <https://geoportal.metropolregion.hamburg.de/mrhportal/index.html> (letzter Zugriff: 29.11.2019).
- Narboneta, Chelcie & Teknomo, Kardi (2013): OpenTripPlanner, OpenStreetMap, General Transit Feed Specification: Tools for Disaster Relief and Recovery. *Proceeding of the 7th IEEE International Conference Humanoid, Nanotechnology, Information Technology Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. 12.-16.11.2013, Hotel Centro, Puerto Princesa, Palawan (Philippinen).
- Nassir, Neema; Hickman, Mark; Malekzadeh, Ali & Irannezhad, Elnaz (2016): A utility-based travel impedance measure for public transit network accessibility. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 88, S. 26–39.
- Neis, Pascal (2014): *Analysis of User-generated Geodata Quality for the Implementation of Disabled People Friendly Route Planning*. Dissertation. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- Neis, Pascal; Zielstra, Dennis & Zipf, Alexander (2012): The Street Network Evolution of Crowdsourced Maps: OpenStreetMap in Germany 2007–2011. *Future Internet* 4(4), S. 1–21.
- Neumeier, Stefan (2013): Modellierung der Erreichbarkeit öffentlicher Apotheken: Untersuchung zum regionalen Versorgungsgrad mit Dienstleistungen der Grundversorgung. In: Thünen-Institut für Ländliche Räume (Hrsg.): *Thünen Working Paper 14*. Braunschweig.

- Neumeier, Stefan (2014): Modellierung der Erreichbarkeit von Supermärkten und Discountern: Untersuchung zum regionalen Versorgungsgrad mit Dienstleistungen der Grundversorgung. In: Thünen-Institut für Ländliche Räume (Hrsg.): *Thünen Working Paper 16*. Braunschweig.
- Neumeier, Stefan (2017): Regionale Erreichbarkeit von ausgewählten Fachärzten, Apotheken, ambulanten Pflegediensten und weiteren ausgewählten Medizindienstleistungen in Deutschland – Abschätzung auf Basis des Thünen-Erreichbarkeitsmodells. In: Thünen-Institut für Ländliche Räume (Hrsg.): *Thünen Working Paper 17*. Braunschweig.
- Neutens, Tijs; Schwanen, Tim; Witlox, Frank & Maeyer, Philippe De (2008): My space or your space? Towards a measure of joint accessibility. *Computers, Environment and Urban Systems* 32(5), S. 331–342.
- Neutens, Tijs; Versichele, Mathias & Schwanen, Tim (2010): Arranging place and time: A GIS toolkit to assess person-based accessibility of urban opportunities. *Applied Geography* 30(4), S. 561–575.
- Nexiga Geodaten GmbH (2016): Arbeitsplätze auf Straßenabschnittsebene 2015. Bonn.
- Nicolai, Thomas & Nagel, Kai (2011): Investigating accessibility indicators for feedback from a travel to a land use model. 51st ERSI Congress 30.08.-02.09.2011. Barcelona (ES).
- Nischwitz, Guido; Chojnowski, Patrick & Krönert, Wendy (2019): Verstärkung des Aktionsprogramms regionale Daseinsvorsorge (ArD) in 21 Modellregionen: Studie im Rahmen des MORO »Netzwerk Daseinsvorsorge«. In: BMI, Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (Hrsg.): *MORO Forschung Heft 3*. Berlin.
- O’Sullivan, David; Morrison, Alastair & Shearer, John (2000): Using desktop GIS for the investigation of accessibility by public transport: An isochrone approach. *International Journal of Geographical Information Science* 14(1), S. 85–104.

- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development (2019): *OECD-Berichte zur Regionalentwicklung: Metropolregion Hamburg, Deutschland*. Paris: OECD Publishing.
- Okabe, Atsuyuki (1976): A theoretical comparison of the opportunity and gravity models. *Regional Science and Urban Economics* 6(4), S. 381–397.
- Openshaw, Stan (1996): Developing GIS-relevant zone-based spatial analysis methods. In: Longley, P. A. & Batty, M. (Hrsg.): *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment*. S. 55–73. New York: John Wiley and Sons.
- Openshaw, Stan (1984): *The modifiable area unit problem*. Norwich: Geobooks.
- Openshaw, Stan & Rao, L (1995): Algorithms for Reengineering 1991 Census Geography. *Environment and Planning A* 27(3), S. 425–446.
- OSM, OpenStreetMap und Mitwirkende (o.J.): *OpenStreetMap: Die freie Weltkarte*. www.openstreetmap.org (letzter Zugriff: 30.11.2019). Lizenz: CC-BY-SA 2.0
- ÖROK, Österreichischen Raumordnungskonferenz (Hrsg.) (2007): Erreichbarkeitsverhältnisse in Österreich 2005: Modellrechnungen für den ÖPNRV und MIV. *Schriftenreihe* Nr. 174. Wien.
- ÖROK, Österreichischen Raumordnungskonferenz (Hrsg.) (2018): ÖROK-Erreichbarkeitsanalyse 2018 (Datenbasis 2016): Analysen zum ÖV und MIV. *Schriftenreihe* Nr. 203. Wien.
- Owen, Andrew & Levinson, David M. (2012): Access to Destinations: Annual Accessibility Measure for the Twin Cities Metropolitan Region. *Access to Destinations Study* 13. Minnesota (USA).
- Owen, Andrew & Levinson, David M. (2015): Modeling the commute mode share of transit using continuous accessibility to jobs. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 74, S. 110–122.
- Owen, Andrew; Murphy, Brendan & Levinson, David M. (2017): *Access Across America: Transit 2016*. Center for Transportation Studies University of Minnesota (Hrsg.). Minneapolis (USA).

- Páez, Antonio; Scott, Darren M. & Morency, Catherine (2012): Measuring accessibility: Positive and normative implementations of various accessibility indicators. *Journal of Transport Geography* 25, S. 141–153.
- Papa, Enrica; Silva, Cecilia; Te Brömmelstroet, Marco & Hull, Angela (2016): Accessibility instruments for planning practice: A review of European experiences. *Journal of Transport and Land Use* 9(3), S. 57–75.
- Papa, Enrica; Coppola, Pierluigi; Angiello, Gennaro & Carpentieri, Gerardo (2017): The learning process of accessibility instrument developers: Testing the tools in planning practice. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 104, S. 108–120.
- Peetz, Christian & Maget, Christoph (2017): Landesverkehrsmodell Bayern: Ein einheitliches Verkehrsplanungsinstrument für Bayern. *bau intern* Juli/August 2017, S. 28–31.
- Peter, Marcus (2018): Für ein besseres Raumverständnis: Das Erreichbarkeitsportal der Metropolregion Hamburg. *PLANERIN* 18(3), S. 12–15.
- Peter, Marcus (2019): Das Erreichbarkeitsmodell für den Daseinsvorsorgeatlas. In: Matthes, Gesa (Hrsg.): *Urban Rural SOLUTIONS: Innovationen im regionalen Daseinsvorsorgemanagement durch Unterstützung von interkommunalen Kooperationen*. S. 249–275. Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik, Band 20. Münster: Münsterscher Verlag für Wissenschaft.
- Peter, Marcus & Gertz, Carsten (2017): Leitprojekt Regionale Erreichbarkeitsanalysen: *Abschlussbericht und Erreichbarkeitsatlas*. MRH, Metropolregion Hamburg (Hrsg.). Hamburg.
- Pinjari, Abdul Rawoof & Bhat, Chandra R., (2011): Activity-based travel demand analysis. In: de Palma, André; Lindsey, Robin; Quinet, Emile & Vickerman, Roger (Hrsg.): *A Handbook of Transport Economics*. S. 213–248. Cheltenham (UK) und Northampton (USA): Edward Elgar Publishing Limited.
- PBV, Planungsbüro für Verkehr, Bornkessel & Markgraf & ETC Transport Consultants GmbH (2014a): *Regionaler Nahverkehrsplan Westmecklenburg – Teil A: Regionaler Teil*. Berlin.

- PBV, Planungsbüro für Verkehr, Bornkessel & Markgraf & ETC Transport Consultants GmbH (2014b): *Regionaler Nahverkehrsplan Westmecklenburg – Teil B: Landkreis Ludwigslust-Parchim*. Berlin.
- PBV, Planungsbüro für Verkehr, Bornkessel & Markgraf & ETC Transport Consultants GmbH (2015): *Regionaler Nahverkehrsplan Westmecklenburg – Teil C: Landkreis Nordwestmecklenburg*. Berlin.
- Platzer, Gerhard & Purschke, Herbert (1989): *Erreichbarkeitsverhältnisse in Österreich*. Wien.
- Poelman, Hugo & Dijkstra, Lewis (2015): Measuring access to public transport in European cities. Measuring Access to Public Transport in European Cities. *Working Papers* WP01/2015. European Commission (Hrsg.). Brüssel.
- Pooler, James (1987): Measuring geographical accessibility: a review of current approaches and problems in the use of population potentials. *Geoforum* 18(3), S. 269–289.
- Preston, John & Rajé, Fiona (2007): Accessibility, mobility and transport-related social exclusion. *Journal of Transport Geography* 15(3), S. 151–160.
- Prinz, Thomas & Herbst, Stefan (2008): *Multikriterielle Modellierung der ÖV-Erreichbarkeit für die Stadt Wien*. Research Studios Austria Forschungsgesellschaft mbh & Studio iSPACE (Hrsg.). Salzburg.
- Proffitt, David G.; Bartholomew, Keith; Ewing, Reid & Miller, Harvey J. (2019): Accessibility planning in American metropolitan areas: Are we there yet? *Urban Studies* 56(1), S. 167–192.
- PTV AG (2018): *PTV Visum 17: Handbuch*. Karlsruhe.
- PTV Transport Consult GmbH (2017): 3. *Regionaler Nahverkehrsplan RNVP (2017-2022) der Stadt Neumünster*. Stadt Neumünster (Hrsg.). Karlsruhe und Neumünster.

- Pusch, Charlotte (2019): Anwender im Fokus – Nutzerbeteiligung bei der Entwicklung des digitalen Daseinsvorsorgeatlas. In: Matthes, Gesa (Hrsg.): *Urban Rural SOLUTIONS: Innovationen im regionalen Daseinsvorsorgemanagement durch Unterstützung von interkommunalen Kooperationen*. S. 187-222. Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik, Band 20. Münster: Münsterscher Verlag für Wissenschaft.
- Pütz, Thomas & Schönfelder, Stefan (2018): Verkehrsbild Deutschland: Angebotsqualitäten und Erreichbarkeiten im öffentlichen Verkehr. In: BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im BBR (Hrsg.): *BBSR-Analysen KOMPAKT* 08/2018.
- Rauch, Sebastian & Rauh, Jürgen (2016): Verfahren der GIS-Modellierung von Erreichbarkeiten für Schlaganfallversorgungszentren. *Raumforschung und Raumordnung* 74(5), S. 437-450.
- Reynolds, Stephen & Department for Transport (2005): Accessibility Planning- Tools, Data and Outputs. Department for Transport (Hrsg.). *CLIP 2005 Conference* am 05.10.2005 in London.
- Richardson, A. J. & Young, W. (1982): A measure of linked-trip accessibility. *Transportation Planning and Technology* 7(2), S. 73-82.
- Ritsema van Eck, Jan; Burghouwt, Guillaume & Dijst, Martin (2005): Lifestyles, spatial configurations and quality of life in daily travel: An explorative simulation study. *Journal of Transport Geography* 13(2), S. 123-134.
- Röntgen, Ole & Pusch, Charlotte (2019): Chancen und Grenzen des Einsatzes von Open-Source-Routingtools im Daseinsvorsorgeatlas am Beispiel des »OpenTripPlanner«. In: Matthes, Gesa (Hrsg.): *Urban Rural SOLUTIONS: Innovationen im regionalen Daseinsvorsorgemanagement durch Unterstützung von interkommunalen Kooperationen*. S. 277-294. Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik, Band 20. Münster: Münsterscher Verlag für Wissenschaft.

- Roth, Matthew (2010): *How Google and Portland's TriMet Set the Standard for Open Transit Data*. Streetsblog. <https://sf.streetsblog.org/2010/01/05/how-google-and-portlands-trimet-set-the-standard-for-open-transit-data/> (letzter Zugriff: 02.12.2019).
- Sadler, Richard C.; Gilliland, Jason A. & Arku, Godwin (2011): An application of the edge effect in measuring accessibility to multiple food retailer types in Southwestern Ontario, Canada. *International Journal of Health Geographics* 10(34). S. 1-14.
- Salonen, Maria & Toivonen, Tuuli (2013): Modelling travel time in urban networks: Comparable measures for private car and public transport. *Journal of Transport Geography* 31, S. 143–153.
- Salze, Paul; Banos, Arnaud; Oppert, Jean Michel; Charreire, Hélène; Casey, Romain; Simon, Chantal; Chaix, Basile; Badariotti, Dominique & Weber, Christiane (2011): Estimating spatial accessibility to facilities on the regional scale: An extended commuting-based interaction potential model. *International Journal of Health Geographics* 10(2), S. 1–16.
- Schäffer, Daniel (2018): *Die Potenziale des Einsatzes der Erreichbarkeitsanalyse in Nahverkehrsplänen*. Bachelorarbeit. Hamburg: Institut für Verkehrsplanung und Logistik, Technische Universität Hamburg.
- Scheiner, Joachim (2003): Akteure in der Verkehrsplanung. Raum und Mobilität. Arbeitspapiere des Fachgebiets Verkehrswesen und Verkehrsplanung 6. Universität Dortmund, *Fachgebiet Verkehrswesen und Verkehrsplanung*.
- Schnabel, Werner & Lohse, Dieter (1997): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 2*. 2. Auflage., Berlin: Verlag für Bauwesen GmbH.
- Scholz, Theresa; Reiher, Jörg; Rauscher, Cerstin & Bachteler, Tobias (2012): Geocoding of German Administrative Data Geocoding of German Administrative Data: The Case of the Institute for Employment Research. *FDZ-Methodenreport* 09/2012. Bundesagentur für Arbeit (Hrsg.). Nürnberg.

- Schürmann, Carsten (2008): Berechnung verschiedener Erreichbarkeitsindikatoren für den Ostseeraum: mit ArcGIS Network Analyst. *14. Deutschsprachige ESRI Anwenderkonferenz*. München.
- Schürmann, Carsten; Spiekermann, Klaus & Wegener, Michael (1997): Accessibility Indicators. *Berichte aus dem Institut für Raumplanung* 39. Institut für Raumplanung, Universität Dortmund.
- Schwarze, Björn (2005): Erreichbarkeitsindikatoren in der Nahverkehrsplanung. Arbeitspapier 184. Institut für Raumplanung, Universität Dortmund.
- Schwarze, Björn (2015): *Eine Methode zum Messen von Naherreichbarkeit in Kommunen*. Dissertation. Münster: MV-Verlag.
- Seip, Christian; Bill, Ralf & Kinskofer, Andreas (2015): Erreichbarkeitsanalysen auf Grundlage von OpenStreetMap und ArcGIS Online zur Notfallversorgung in Mecklenburg-Vorpommern. *Gis Science* 28(3), S. 94–104.
- Shen, Q. (1998): Location characteristics of inner-city neighborhoods and employment accessibility of low-wage workers. *Environment and Planning B: Planning and Design* 25(3), S. 345–365.
- Shen, Qingyun; Levine, Jonathan; Grengs, Joe & Shen, Qing (2012): Does accessibility require density or speed? *Journal of the American Planning Association* 78(2), S. 157–172.
- Silva, Cecilia (2008): Comparative Accessibility for Mobility Management: *Comparative Accessibility for Mobility Management*. Oporto: University of Oporto.
- Silva, Cecilia; Bertolini, Luca; te Brömmelstroet, Marco; Milakis, Dimitris & Papa, Enrica (2017a): Accessibility instruments in planning practice: Bridging the implementation gap. *Transport Policy* 53, S. 135–145.
- Silva, Cecilia; Patatas, Tiago & Amante, Ana (2017b): Evaluating the usefulness of the structural accessibility layer for planning practice – Planning practitioners’ perception. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 104, S. 137–149.

- Silva, Cecília & Larsson, Anders (2018): Challenges for Accessibility Planning and Research in the Context of Sustainable Mobility. In: OECD, International Transport Forum (Hrsg.): *Discussion Paper*. Paris.
- Slupina, Manuel; Dähner, Susanne; Reibstein, Lena; Amberger, Julia; Sixtus, Frederik; Grunwald, Jennifer & Klingholz, Reiner (2019): *Die demografische Lage der Nation: Wie zukunftsfähig Deuschlands Regionen sind*. Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung (Hrsg.). Berlin.
- Social Exclusion Unit (Hrsg.) (2003): Making the Connections: *Final Report on Transport and Social Exclusion*. Social Exclusion Unit of the Office of the Deputy Prime Minister. London.
- Solow, Robert M. (1973): Rejoinder to Richardson—I ('A Comment on Some Uses of Mathematical Models in Urban Economics A Comment on Some Uses of Mathematical Models in Urban Economics'). *Urban Studies* 10(2), p.267.
- Spiekermann, Klaus & Wegener, Michael (2000): Freedom from the Tyranny of Zones : Towards New GIS-based Spatial Models. In: Fotheringham, A. S. & Wegener, Michael (Hrsg.): *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models*. S. 45–61. London: Taylor & Francis.
- Spiekermann, Klaus & Neubauer, Jörg (2002): European Accessibility and Peripherality: Concepts, Models and Indicators. *Nordregio Working Paper* 2002: 9. Nordregio – the Nordic Centre for Spatial Development (Hrsg.). Stockholm.
- Spiekermann, Klaus & Schwarze, Björn (2014): *Kleinräumige Bevölkerungsvorausschätzung und Erreichbarkeitsmodellierung im Aktionsprogramm regionale Daseinsvorsorge: Abschlussergebnisse der Begleitforschung Zentrale Datendienste*. Spiekermann & Wegener, Stadt- und Regionalforschung, Dortmund.
- SRTM, Shuttle Radar Topography Mission (2000): *SIR-C Höhenmodell*. https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/ (letzter Zugriff: 14.02.2014).

- Statistisches Landesamt (Hrsg.) (1991): Statistische Gebiete als kleinräumige Gliederungseinheiten Hamburgs. *Hamburg in Zahlen* 4.1991. S. 92–99.
- Stellmacher, Florian (2010): *Formelle und informelle Instrumente & Verfahren in der Raumplanung*. Lehrmodul Formelle und informelle Instrumente & Verfahren. Institut für Raum- und Landschaftsentwicklung, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Stępnia, Marcin; Rosik, Piotr & Komornicki, Tomasz (2013): Accessibility patterns: Poland Case Study. *EUROPA XXI* 24, S. 77–93, Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences, Warschau.
- Stępnia, Marcin & Rosik, Piotr (2015): The impact of data aggregation on potential accessibility values. In: Ivan, Igor; Benenson, Itzhak; Jiang, Bin; Horák, Jiří; Haworth, James & Inspektor, Tomáš (Hrsg.): *Geoinformatics for Intelligent Transportation*. S. 227–240. Basel: Springer International Publishing.
- Stępnia, Marcin & Goliszek, Sławomir (2017): Spatio-temporal variation of accessibility by public transport—the equity perspective. In: Ivan, I.; Singleton, Alex; Horák, Jiří & Inspektor, Tomáš (Hrsg.): *The Rise of Big Spatial Data: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. S. 241–261. Basel: Springer International Publishing.
- Stępnia, Marcin & Jacobs-Crisioni, Chris (2017): Reducing the uncertainty induced by spatial aggregation in accessibility and spatial interaction applications. *Journal of Transport Geography* 61, S. 17–29.
- Stępnia, Marcin & Rosik, Piotr (2018): The Role of Transport and Population Components in Change in Accessibility: the Influence of the Distance Decay Parameter. *Networks and Spatial Economics* 18, S. 291–312.
- Stępnia, Marcin; Pritchard, John P.; Geurs, Karst T. & Goliszek, Sławomir (2019): The impact of temporal resolution on public transport accessibility measurement: Review and case study in Poland. *Journal of Transport Geography* 75, S. 8–24.

- Stewart, John Q. (1941): An inverse distance variation for certain social influences. *Science* 93(2404), S. 89–90.
- Stewart, John Q. (1948): Demographic Gravitation: Evidence and Applications. *Sociometry* 11(1/2), S. 31–58.
- Streit, Ulrich (2011): *ohne Titel*. http://ifgivor.uni-muenster.de/vorlesungen/Geoinformatik/kap/kap4/ko4_6.htm (letzter Zugriff: 18.04.2011).
- SVG Südholstein Verkehrsservicegesellschaft mbH (2014): *Vierter regionaler Nahverkehrsplan Kreis Segeberg 2014-2018*, Norderstedt.
- Thomas, R. (1969): *Measures of Accessibility: Political and Economic Planning*. London.
- Timpf, Sabine (o.J.): *Einführung in die Geoinformatik*. https://www.informatik.uni-augsburg.de/de/lehrstuehle/dbis/pmi/lectures/vorhergehende_semester/ws1011/Funk_Mod_Geo/Skript/FuGeo05.pdf (letzter Zugriff: 02.12.2019). Institut für Geographie, Universität Augsburg.
- Tribby, Calvin P. & Zandbergen, Paul A. (2012): High-resolution spatio-temporal modeling of public transit accessibility. *Applied Geography* 34(4), S. 345–355.
- urbanus GbR (2014): *Dritter Regionaler Nahverkehrsplan Kreis Herzogtum Lauenburg 2014-2018*. Kreis Herzogtum Lauenburg (Hrsg.). Lauenburg.
- urbanus GbR (2017): *Vierter Regionaler Nahverkehrsplan: Kreis Stormarn 2017-2021*. Kreis Stormarn (Hrsg.). Bad Oldesloe.
- urbanus GbR & SVG Südholstein Verkehrsservicegesellschaft mbH (2014): *Dritter Regionaler Nahverkehrsplan Kreis Dithmarschen 2014-2018*. Kreis Dithmarschen (Hrsg.). Heide.
- urbanus GbR & SVG Südholstein Verkehrsservicegesellschaft mbH (2017): *Vierter Regionaler Nahverkehrsplan Steinburg 2017-2021*. Kreis Steinburg (Hrsg.). Itzehoe.
- Vale, David S.; Saraiva, Miguel & Pereira, Mauro (2016): Active accessibility: A review of operational measures of walking and cycling accessibility. *Journal of Transport and Land Use* 9(1), S. 209–235.

- Vandenbulcke, Grégory; Steenberghen, Thérèse & Thomas, Isabelle (2009): Mapping accessibility in Belgium: a tool for land-use and transport planning? *Journal of Transport Geography* 17(1), S. 39–53.
- VDV, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2019): Verkehrserschließung, Verkehrsangebot und Netzqualität im ÖPNV. *VDV-Schrift 4* (01/2019). Köln.
- VDV, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2001): Verkehrserschließung und Verkehrsangebot im ÖPNV. *VDV-Schrift 4* (6/2001). Köln.
- VNO, Verkehrsgesellschaft Nord-Ost-Niedersachsen mbH (2017): *Nahverkehrsplan: Landkreis Harburg für den Zeitraum 2017 bis 2021*. Landkreis Harburg (Hrsg.). Winsen (Luhe) und Stade.
- VNO, Verkehrsgesellschaft Nord-Ost-Niedersachsen mbH (2018a): *4. Nahverkehrsplan Landkreis Lüneburg 2018 – 2023*. Landkreis Lüneburg (Hrsg.). Lüneburg und Stade.
- VNO, Verkehrsgesellschaft Nord-Ost-Niedersachsen mbH (2018b): *Nahverkehrsplan für den Landkreis Stade 2018 – 2023*. Landkreis Stade (Hrsg.). Stade.
- VNO, Verkehrsgesellschaft Nord-Ost-Niedersachsen mbH (2019): *Nahverkehrsplan des Landkreises Cuxhaven 2019 – 2023 (Entwurf)*. Landkreis Cuxhaven (Hrsg.). Cuxhaven und Stade.
- Vonk, Guido; Geertman, Stan & Schot, Paul (2005): Bottlenecks blocking widespread usage of planning support systems. *Environment and Planning A* 37(5), S. 909–924.
- Vonk, Guido Antonius (2006): *Improving Planning Support: The use of planning support systems for spatial planning*. Utrecht: Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap Faculteit Geowetenschappen Universiteit Utrecht.
- Wachs, Martin & Kumagai, T. Gordon (1973): Physical accessibility as a social indicator. *Socio-Economic Planning Sciences* 7(5), S. 437–456.
- Wagner, Otto (1893): *Generalregulierungsplan für Wien, Übersichtsplan mit »Stellen«*. Wien.

- Warntz, William (1979): Places of birth, education, and activity of American leaders as related to flows. *Ontario Geography* 13, S. 3–23.
- van Wee, Bert (2016): Accessible accessibility research challenges. *Journal of Transport Geography* 51, S. 9–16.
- Wee, Bert Van & Banister, David (2016): How to Write a Literature Review Paper? *Transport Reviews* 36(2), S. 278–288.
- Wegener, Michael; Eskelinen, Heikki; Fürst, Franz; Schürmann, Carsten & Spiekermann, Klaus (2001): Criteria for the Spatial Differentiation of the EU Territory: Geographical Position: Study Programme on European Spatial Planning. *Forschungen* 102.2. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.). Bonn.
- Wegener, Michael (2004): Overview of land-use transport models. In: Hensher, David A. & Button, Kenneth (Hrsg.): *Transport Geography and Spatial Systems*. S. 127–146 Kidlington (UK): Pergamon/Elsevier Science.
- Wegener, Michael (2011): From macro to micro-how much micro is too much? *Transport Reviews* 31(2), S. 161–177.
- Wegener, Michael (2014): Land-use transport interaction models. In: Fischer, Manfred M. & Nijkamp, Peter (Hrsg.): *Handbook of Regional Science*. S. 741–758. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag.
- Weiss, Lucas; Schwillinsky, Stefan; Castellazzi, Bernhard & Prinz, Thomas (2018): Erreichbarkeitsmodell Österreich – ein Werkzeug zur österreichweiten Analyse der Versorgung mit MIV und ÖV. *Journal für Angewandte Geoinformatik* 2018(4), S. 235–240.
- Widener, Michael J.; Farber, Steven; Neutens, Tijs & Horner, Mark W. (2013): Using urban commuting data to calculate a spatiotemporal accessibility measure for food environment studies. *Health and Place* 21, S. 1–9.
- Widener, Michael J.; Farber, Steven; Neutens, Tijs & Horner, Mark (2015): Spatiotemporal accessibility to supermarkets using public transit: An interaction potential approach in Cincinnati, Ohio. *Journal of Transport Geography* 42, S. 72–83.

- Widener, Michael J. (2017): Comparing Measures of Accessibility to Urban Supermarkets for Transit and Auto Users. *Professional Geographer* 69(3), S. 362–371.
- Wieland, Thomas & Dittrich, Christoph (2016): *Bestands- und Erreichbarkeitsanalyse regionaler Gesundheitseinrichtungen in der Gesundheitsregion Göttingen*. GEODOC, Dokumenten- und Publikationsserver der Georg-August-Universität Göttingen.
- Winkel, Rainer; Greiving, Stefan & Pietschmann, Holger (2007): *Sicherung der Daseinsvorsorge und Zentrale-Orte-Konzepte – gesellschaftspolitische Ziele und räumliche Organisation in der Diskussion*. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/MORO/Studien/2007/SicherungDaseinsvorsorge/DL_%20Diskussionsstand.html?nn=433580 (letzter Zugriff: 02.12.2019).
- Winter, Olaf Markus (2005): Die Analyse und Evaluation von Nahverkehrsplänen und die Aufstellung von Kriterien zur Bewertung von Standards im ÖPNV. *Schriftenreihe Verkehr* 16. Institut für Verkehrswesen der Universität Kassel. Kassel: University Press GmbH.
- Wu, Belinda M. & Hine, Julian P. (2003): A PTAL approach to measuring changes in bus service accessibility. *Transport Policy* 10(4), S. 307–320.
- Wulfhorst, Gebhard; Büttner, Benjamin & Keller, Johannes (2010): *Ein Erreichbarkeitsatlas für die europäische Metropolregion München*. Europäische Metropolregion München e.V. (Hrsg.). München.
- Zumkeller, Dirk; Chlond, Bastian; Kuhnimhof, Tobias; Kagerbauer, Martin; Schlosser, Carsten; Wirtz, Matthias & Ottmann, Peter (2010): *Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – wissenschaftliche Begleitung und erste Auswertungen: Bericht 2008*. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 70.0813/2007. Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe.
- Zuo, Ting; Wei, Heng & Rohne, Andrew (2018): Determining transit service coverage by non-motorized accessibility to transit: Case study of applying GPS data in Cincinnati metropolitan area. *Journal of Transport Geography* 67, S. 1–11.

8 Anhang

Tabelle 57: Übersicht regionaler Erreichbarkeitsmodelle in Wissenschaft und Praxis

Nr.	Quelle und Region	Fahplandaten und Software	Detaillierung der Wege	Raumbezug	Indikatoren	Fokus und Ergebnisse
1	Anderson et al. (2013) Metropolregion Minneapolis-Saint Paul (USA)	Daten: unklar ArcGIS Network-Analyst	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + MIV ➤ fahrplanbasiert ➤ ohne SWZ ➤ nicht Tür-zu-Tür 	1.236 Verkehrszellen	Kumulations- und Potenzialindikatoren (Arbeitsplätze, Einwohner) Bewertungsindikator für Szenarien des Gesamtgebietes	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Erreichbarkeit als Indikator für Szenarien der Landnutzung und der Verkehrsinfrastruktur
2	BBSR o.J.b; Pütz & Schönfelder (2018) Deutschland	ÖV-Daten: HaCon Fahrplanauszug ArcGIS Network-Analyst	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + MIV ➤ ohne SZW ➤ nicht Tür-zu-Tür 	~40 Tsd. Knoten ~ 11 Tsd. Gemeinden	Reiseaufwandsindikatoren	<ul style="list-style-type: none"> ➤ bundesweite Erreichbarkeitsanalysen
3	Benenson et al. (2011) Metropolregion Tel Aviv	Daten: unklar nur Busverkehr ArcGIS Network-Analyst und VBA	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + MIV ➤ Tür-zu-Tür aber vereinfachter Fahrplan ➤ mit SWZ 	~300 Verkehrszellen	Kumulationsindikatoren (Arbeitsplätze) Vergleich ÖV <> MIV	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vergleich der Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen im MIV und ÖV; MIV mit höherer Erreichbarkeit als ÖV (2- bis 8-fach) ➤ Berücksichtigung von Umstiegen bei der Routensuche
4	Benenson et al. (2017b) Metropolregion Tel Aviv	GTFS Neo4j (ÖV-Matrize)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + MIV ➤ Tür-zu-Tür ➤ mit SWZ ➤ einfacher Zugang Hst. (maximal 400 Meter) 	> 100 Tsd. Gebäude	Kumulations- und Potenzialindikatoren (Arbeitsplätze) Vergleich ÖV <> MIV	<ul style="list-style-type: none"> ➤ höhere Genauigkeit der hohen Auflösung im Vergleich zu Verkehrszellen (innere Heterogenität), gerade bei kurzen Reisezeiten und/oder großen Zellen
5	Berta et al. (2017) Italien	Daten: unklar nur Fernverkehr	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + Fernbus + MIV + Flugzeug + Schiff ➤ nicht Tür-zu-Tür 	371 Verkehrszellen	Potenzialindikatoren (Einwohner und Arbeitsplätze) Reisezeiten und Bedienungsfrequenzen	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Berechnung generalisierter Kosten für alle Verkehrsmittel ➤ Vergleich der Erreichbarkeiten im Fernverkehr für ganz Italien

Nr.	Quelle und Region	Fahrapdaten und Software	Detaillierung der Wege	Raumbezug	Indikatoren	Fokus und Ergebnisse
6	Boisjoly & El-Geneidy (2016) Greater Toronto Hamilton Area	GTFS OTP	<ul style="list-style-type: none"> Matrixen mit ÖV-Reisezeiten keine SWZ 	~1.100 Zensusgebiete	Kumulations- und Potenzialindikatoren (Arbeitsplätze)	<ul style="list-style-type: none"> Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen nach Tageszeit geringer Einfluss des Fahrplans und der verfügbaren Arbeitsplätze auf die Erreichbarkeit im Tagesverlauf
7	Bok & Kwon (2016) sechs Städte und Regionen (USA, Kanada, Südkorea)	GTFS MS Access	<ul style="list-style-type: none"> kein Routing stündliche Haltestellenbedienungen 	Rasterzellen Circa 1 Km ² < 20 Tsd.	System accessibility	<ul style="list-style-type: none"> in Europa Zugang zum ÖV besser als in Nordamerika bei dichter Besiedlung besser als bei dünner Bestedlung
8	Chen et al. (2016) Peking, Bezirk Chao Yang	Daten: unklar ArcGIS Network Analyst	<ul style="list-style-type: none"> kein Routing Berücksichtigung von Linienverläufen 	30 Verkehrszellen	Gewichtete Kumulationsindikatoren	<ul style="list-style-type: none"> Vergleich der Dichte des ÖPNV-Netzes mit dem Straßennetz, Bedeutung der Umsteigehäufigkeit
9	Chowdhury et al. (2014) Auckland, London, Paris	Google Transit (API)	<ul style="list-style-type: none"> Tür-zu-Tür konstante SWZ 	~10 Startpunkte	Reiseaufwandsindikatoren Konnektivitätsindikatoren	<ul style="list-style-type: none"> Kombination quantitativer Auswertungen mit einer qualitativen Erhebung innerstädtischer Vergleich der Angebotsqualität im ÖPNV
10	Curtis & Scheurer (2017) 25 Städte weltweit	Daten: unklar eigenes Skript; API	<ul style="list-style-type: none"> einfaches Routing auf Basis eines vereinfachten Netzes linienfeines Verfahren 	maximal ~200 je Stadt (Aktivitäts-) Knoten bedeutende Haltestellen	Kumulationsindikatoren (Arbeitsplätze, Einwohner) weitere komplexe Erreichbarkeitsindikatoren	<ul style="list-style-type: none"> Vergleich der Qualität des ÖPNV zwischen einzelnen Städten Berücksichtigung der Landnutzung Auswirkungen von Szenarien auf das ÖPNV-System und die Erreichbarkeit

Nr.	Quelle und Region	Fahrlanddaten und Software	Detaillierung der Wege	Raumbezug	Indikatoren	Fokus und Ergebnisse
11	Durhuus et al. (2016) Metropolregion Kopenhagen	SQL und ArcGIS	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ ohne SWZ 	29.447 Adressen	Isochronen	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bedeutung des Routings über mehrere Haltestellen und nicht nur über die nächste ➤ Fahrpreis normalisiert über Stundenlohn ➤ Vergleich zwischen Erreichbarkeit nach Reisezeiten und Reisekosten ➤ sozial Benachteiligte besitzen einen eher besseren ÖPNV-Anschluss aufgrund der Raumstruktur
12	El-Geneidy et al. (2016) Greater Montreal Area	GTFS Fahrpreis: Kostenmatrix OTP	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ konstante SWZ 	921 Verkehrszellen	Kumulationsindikatoren (Arbeitsplätze) nach Reisezeit und Fahrpreis	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bedeutung von Angebotsausweitungen auf die Reisezeiten im Tagesverlauf ➤ räumlich differenzierte Variationen der Reisezeiten im Tagesverlauf ➤ Bedeutung des Fahrradbesitzes auf der letzten Meile
13	Farber & Fu (2017) Wasatch Front, Utah und Portland, Oregon (USA)	GTFS ArcGIS Network Analyst	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ ohne SWZ ➤ einfacher Zugang zur Haltestelle 	~2 Tsd. Zensusbaublöcke	Kumulationsindikatoren (Arbeitsplätze, Einwohner) durchschnittliche Reisezeit für Matrize über alle Blöcke	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bedeutung von Angebotsausweitungen auf die Reisezeiten im Tagesverlauf ➤ räumlich differenzierte Variationen der Reisezeiten im Tagesverlauf ➤ Bedeutung des Fahrradbesitzes auf der letzten Meile
14	Farber et al. (2016) Wasatch Front, Utah (USA)	GTFS ArcGIS Network Analyst	<ul style="list-style-type: none"> ➤ nur Fahrzeiten zwischen Haltestellen ➤ 7.472 Fahrpläne 	1.326 Zensusbaublöcke	Reisezeitmatrize für alle Zensusblöcke für jede Minute am Tag (1.440 Auswertungen)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV-Angebot ist sozial ungerecht, da benachteiligte Gruppen eher reisen, wenn Angebot relativ schlechter ist
15	Farber et al. (2014) Cincinnati, Ohio (USA)	GTFS ArcGIS (GTFS to Network)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ konstante SWZ (0,3 Minuten) ➤ Fußweg wenn schneller 	~10 Tsd. Zensusblöcke * 98 Supermärkte	Reiseaufwandsindikator Reisezeit zu den nächsten zehn Supermärkten für jede Minute am Tag (Mittelwert und Standardabweichung)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Erreichbarkeit von Supermärkten im Tagesverlauf in Abhängigkeit von sozioökonomischen Personenmerkmalen

Nr.	Quelle und Region	Fahrplandaten und Software	Detaillierung der Wege	Raumbezug	Indikatoren	Fokus und Ergebnisse
16	Fayyaz et al. (2017) Utah (USA)	GTF5 Toolbox auf Basis von C++	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ konstante SWZ ➤ einfacher Zugang zur Haltestelle 	6.265 Haltestellen ~1 Tsd. Verkehrszellen	<p>Kumulations- und Potenzialindikator</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Reisezeit für Matrize über alle Haltestellen 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reisezzeitmatrizen zwischen Haltestellen in 10-Minuten-Intervallen ➤ Bedeutung der Tageszeit und Durchschnittseinkommen für die Erreichbarkeit im ÖV
17	Fayyaz & Liu (2016) St. George, Utah (USA)	GTF5 Toolbox auf Basis von C++	<ul style="list-style-type: none"> ➤ nicht Tür-zu-Tür ➤ konstante SWZ ➤ einfacher Zugang zur Haltestelle 	134 Haltestellen	durchschnittliche Reisezeit für Matrize über alle Haltestellen (Einwohner)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ schnelle Berechnung von Matrizen auf Basis eigener Skripte ➤ tageszeitliche Fluktuation von Erreichbarkeiten im ÖV
18	Fortin et al. (2016) Region Montreal	GTF5 Neo4j graphenbasierte Datenbank	<ul style="list-style-type: none"> ➤ nicht Tür-zu-Tür ➤ ohne SWZ ➤ Haltestellenzugang 	365 Haltestellen	ÖPNV-Konnektivität und Netzabdeckung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Berechnung von Widerstandsmatrizen im ÖV auf Basis einer graphenbasierter Datenbank ➤ Performance noch zu verbessern
19	Fransen et al. (2015) Flandern (Belgien)	GTF5 TomTom MultiNet ArcGIS (GTF5 to Network)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ konstante SWZ ➤ Haltestellenzugang 	308 Gemeinden 6.540 Verkehrszellen	<p>Matrizen über alle Verkehrszellen</p> <p>Reiseaufwandsindikatoren</p> <p>Kumulationsindikatoren</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bedeutung von Erreichbarkeitsmatrizen für die Optimierungen im ÖV in Kombination mit klassischen ÖV-Kennzahlen ➤ Erreichbarkeit schlecht ➤ bezahlter Arbeitsplätze aus Gebieten mit hoher Armut ➤ Eher keine Benachteiligung dieser Gebiete
20	Gulhan et al. (2014) Denizli (Türkei)	Daten: unklar PTV Visum	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Haltestellen-zu-Haltestellen ➤ ohne SWZ 	80 Verkehrszellen	<p>Kumulationsindikatoren</p> <p>(Einwohner, Arbeitsplätze) ÖV-Kennzahlen (Auslastung, Kapazität etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Erreichbarkeit schlecht ➤ bezahlter Arbeitsplätze aus Gebieten mit hoher Armut ➤ Eher keine Benachteiligung dieser Gebiete
21	Hess (2005) Buffalo-Niagara Region (USA)	Daten: unklar Software: unklar	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + MIV ➤ einfache Wege ➤ streckenfeines Verfahren ➤ SWZ = halber Takt 	~1.150 Zensusbaublöcke	Kumulationsindikator (Arbeitsplätze)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ bezahlter Arbeitsplätze aus Gebieten mit hoher Armut ➤ Eher keine Benachteiligung dieser Gebiete

Nr.	Quelle und Region	Fahrraddaten und Software	Detaillierung der Wege	Raumbezug	Indikatoren	Fokus und Ergebnisse
22	Kaplan et al. (2014) Metropolregion Kopenhagen	Daten: unklar/Shape Matlab (Kurzwegsuche) ArcGIS, SQL (Konnektivität)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Tür-zu-Tür ▶ keine SWZ ▶ Zugang Hst. Luflinie 	264 Verkehrszellen 1.300 Haltestellen	Gini-Koeffizienten Matrizen für alle Verkehrszellen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gerechtigkeit im ÖPNV ▶ Aufbau eines Verkehrsmodells ▶ Fokus auf intermodalen Wegen und ihrer Bestandteile ▶ empfohlene Reisezeiten
			<ul style="list-style-type: none"> ▶ GTFS/OSM ▶ ArcGIS (GTFS to Network) 	7.445 Hst.	Potenzialindikator (Arbeitsplätze)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Bewertung des ÖV- Angebotes für unterschiedliche Bevölkerungsgruppen
24	Krizek et al. (2007) Minneapolis, Minnesota (USA)	Daten: Shapes ArcGIS Network Analyst	<ul style="list-style-type: none"> ▶ ÖV + NMIV ▶ Tür-zu-Tür ▶ streckenfeines Verfahren ▶ SWZ = halber Takt ▶ Tür-zu-Tür 	6.555 Zensusblock	Isochronen (mehrere zentrale innerstädtische Gebiete)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Berechnung und Darstellung der Erreichbar- keit aller Verkehrsmodi neuer Ansatz der ÖV- Erreichbarkeitsberechnung
			<ul style="list-style-type: none"> ▶ GTFS über API gtfspy Algorithmus: mcp/CSA GTFS in SQLite Datenbank 	7.643 Haltestellen mit SWZ	Haltestellenmatrize Gewichtung aller Faktoren auf Wegen im ÖV	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Identifizierung partecoptimaler Wege ▶ Bedeutung empfunderer Reisezeiten ▶ Bedeutung von Umstiegen und Bedienungsfähigkeiten für die Qualität von ÖPNV-Angeboten ▶ ausschließlich Open-Daten
26	Lee & Miller (2018) Columbus, Ohio (USA)	GTFS ArcGIS (GTFS to Network)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Tür-zu-Tür ▶ ohne SWZ 	62 Ärzte ~400 Zensuszellen	Kumulationsindikator Bildung von Raum-Zeit- Prismen ausgehend von circa 30 Haltestellen Reisezeit 4*Tag (HVZ, NVZ)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Bewertung der Einführung von BRT und einer Netzum- gestaltung im ÖV auf die Erreichbarkeit von Ärzten und Arbeitsplätzen Berücksichtigung von Öffnungszeiten

Nr.	Quelle und Region	Fahrplandaten und Software	Detaillierung der Wege	Raumbezug	Indikatoren	Fokus und Ergebnisse
27	Lei & Church (2010) Santa Barbara, Kalifornien (USA)	Daten: unklar ArcGIS	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ ohne SWZ 	Hochschulstandort, Vergleich von Flächen	detaillierte isochronen getrennt nach Hin- und Rückrichtung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bedeutung von Ankunfts- und Abfahrtszeiten: Berücksichtigung gewünschter Ankunftszeiten und möglicher Abfahrtszeiten ➤ Routensuche in die entgegengesetzte Richtung.
28	Liao & von Wee (2017) Hague-Rotterdam-Dordrecht Korridor	Daten: unklar Software: unklar	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + MIV ➤ vereinfachte multimodale Wege ➤ Zugang und Abgang = konstant 8 min 	Matrizen zwischen neun Städten	multimodale Wegefindung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Robustheit und Verlässlichkeit der Verkehrssysteme (MIV + ÖV)
29	Martin et al. (2002) Cornwall (UK)	Daten: unklar ArcGIS auf Basis von Rasterzellen	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + MIV ➤ nicht Tür-zu-Tür ➤ linienfeines Verfahren ➤ ohne SWZ ➤ nicht Tür-zu-Tür 	276.661 Rasterzellen	Reiseaufwandsindikatoren (1.043 Gesundheitseinrichtungen)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vergleich der Erreichbarkeit im MIV und ÖV
30	Martin et al. (2008) Devon (UK)	Daten: ATCO-Standard VBA	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Haltestellen-zu-Haltestellen ➤ keine SWZ ➤ nicht Tür-zu-Tür ➤ 5.677 Haltestellen 	11.882 PLZ-Gebiete	Haltestellenmatrizen Reiseaufwandsindikatoren (Krankenhäuser)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Anbindung der Haltestellen an die PLZ-Gebiete über Luftlinien
31	Mavoa et al. (2012) Region Auckland, Neuseeland	Daten: unklar ArcGIS	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ linienfeines Verfahren ➤ Umstiege konstant 10 min ➤ ohne SWZ 	371 Tsd. Blöcke * ~12 Tsd. unterschiedliche Zielaktivitäten	Reiseaufwandsindikatoren (17 Zielkategorien) Bildung eines Indexes mit der durchschnittlichen Reisezeit je Kategorie	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vergleich von zwei Indikatoren: Ohne und mit Berücksichtigung der Bedienthäufigkeit

Nr.	Quelle und Region	Fahrplandaten und Software	Detaillierung der Wege	Raumbezug	Indikatoren	Fokus und Ergebnisse
32	O'Sullivan et al. (2000) Glasgow	Daten: unklar ArcGIS	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Tür-zu-Tür ▶ linienfeines Verfahren ▶ SWZ = halber Takt 	Haltestellen	Isochronen Reiseaufwandsindikatoren	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Isochronen auf Basis von Durchschnittsgeschwindigkeiten auf ÖV-Linien (Bus) oder realen Fahrplänen (Bahn)
33	Owen & Levinson (2015) Metropolregion Minneapolis-Saint Paul (USA)	GIFS OTP	<ul style="list-style-type: none"> ▶ MIV + ÖV ▶ Tür-zu-Tür ▶ ohne SWZ ▶ einfacher Zugang der Haltestellen 	2.085 Zensusbaublöcke	Kumulationsindikator (Arbeitsplätze)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ kontinuierliche Erreichbarkeit, jede Minute während der Peak Time (120 min) ▶ abschließliche Nutzung öffentlich verfügbarer Daten
34	Owen & Levinson (2012) Metropolregion Minneapolis-Saint Paul (USA)	Nexus Transit Travel Time Calculator (RAPTOR Algorithmus) ArcGIS	<ul style="list-style-type: none"> ▶ ÖV + MIV ▶ Tür-zu-Tür ▶ ohne SWZ ▶ einfacher Zugang der Haltestellen 	1.201 Verkehrszellen	Haltestellenmatrizen nach Zeitintervallen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Entwicklung eines Tools mit Python und ArcGIS ▶ Angabe von Zeiten für einzelne Arbeitsschritte (aber unrealistisch schnell)
35	ÖROK (2018) Österreich	HAFAS PTV VISUM (Kerngrößen) ArcGIS	<ul style="list-style-type: none"> ▶ ÖV + MIV ▶ Tür-zu-Tür ▶ ohne SWZ ▶ Haltestellenzugang ▶ Fußweg wenn schneller 	~570 Tsd. 100-Meter-Zellen (bewohnt)	Reiseaufwandsindikatoren (240 Zentren, 2.461 Schulen)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erreichbarkeitsatlas Österreich
36	Prinz & Herbst (2008) Wien	Daten: unklar ArcGIS	<ul style="list-style-type: none"> ▶ ÖV + MIV ▶ Tür-zu-Tür ▶ SWZ = halber Takt ▶ Anbindung der nächsten Haltestelle 	> 10 Tsd. Baublöcke	Reiseaufwandsindikatoren (Zentrum)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erreichbarkeit der Zentren Wiens im ÖV und MIV

Nr.	Quelle und Region	Fahrplandaten und Software	Detaillierung der Wege	Raumbezug	Indikatoren	Fokus und Ergebnisse
37	Salonen & Toivonen (2013)	Daten: unklar ArcGIS	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + MIV ➤ Tür-zu-Tür ➤ SWZ = halber Takt ➤ einfacher Zugang 	6.900 250-Meter-Zellen	<p>Reiseaufwandsindikatoren (59 Bibliotheken)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bedeutung der Berücksichtigung von SWZ und realen Fahrplänen ➤ Bedeutung der Berücksichtigung von Parksuchzeiten und Belastungen im MIV bei Vergleichen zwischen ÖV und MIV ➤ Einfluss unterschiedlicher Detaillierungen auf den Reisezeitvergleich zwischen ÖV und MIV
	Großraum Helsinki					
38	Schwarze (2015)	Daten: DIVA, Excel, PDF ArcGIS (GTFS to Network)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + MIV ➤ Tür-zu-Tür ➤ reale SWZ ➤ Fußwege wenn schneller 	5.045 Hexagone (Radius 150 m)	<p>Potenzialindikatoren Kumulationsindikatoren Reiseaufwandsindikatoren</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nutzung von Erreichbarkeitsindikatoren in der Nahverkehrsplanung ➤ Entwicklung und Ableitung von Indikatoren (ÖV, MIV, Fuß und Rad)
	Dortmund, westliches Ruhrgebiet					
39	Spielermann & Schwarze (2014)	Daten: HAFAS, VDV, Excel ArcGIS (GTFS to Network)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ÖV + MIV ➤ Tür-zu-Tür ➤ reale SWZ ➤ Fußwege wenn schneller 	bewohntes 100*100-Meter-Raster <100 Tsd.	<p>Reiseaufwandsindikatoren zu unterschiedlichen Zielen der Daseinsvorsorge</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Daseinsvorsorge und Erreichbarkeit
	verschiedene Regionen in Deutschland					
40	Stepniak & Goliszek (2017)	GTFS, OSM ArcGIS (GTFS to Network)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ jeweils eine Haltestelle angebinden ➤ konstante SWZ ➤ keine Direktwege 	Matrizen für 1.745 Haltestellen	<p>Haltestellenmatrizen (alle 15 Minuten)</p> <p>Potenzialindikatoren (Einwohner)</p> <p>Gini-Koeffizient Variationskoeffizient</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Veränderungen der Erreichbarkeiten im ÖPNV im Tagesverlauf, gewichtet um die beobachtete Nachfrage in den Linien in Zeitintervallen relativ gleiche Erreichbarkeitsniveaus im Zeitverlauf, jeweils nur absolute Verschiebungen ➤ Gerechtigkeit definiert über die relative Erreichbarkeit zwischen Stadtteilen
	Stettin (Polen)					

Nr.	Quelle und Region	Fahraddaten und Software	Detaillierung der Wege	Raumbezug	Indikatoren	Fokus und Ergebnisse
41	Tribby & Zandbergen (2012) Albuquerque, New Mexico (USA)	Daten: unklar GIS (Software: unklar)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ streckenfines Verfahren ➤ SWZ = halber Takt 	<500 Zensusbaublöcke	<p>Reiseaufwandsindikator (Stadtzentrum)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Auswirkungen von BRT auf die Gerechtigkeit unter Berücksichtigung von Erreichbarkeiten ➤ Aufbau eines Multimodalen-Netzes ➤ Bedeutung eines feinen Wegenetzes für die Haltestellenanbindung
42	Widener et al. (2015) Cincinnati, Ohio (USA)	GTFS ArcGIS Network- Analyst-Addo	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ ohne SWZ ➤ Fußwege wenn schneller 	359 Verkehrszellen	<p>Wegeketten (Supermärkte auf Arbeitswegen) für 1.440 Zeit-scheiben (jede Minute am Tag)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Berechnung der Vorteile, wenn Supermärkte auf dem Weg von der Arbeit zum Wohnort auf-gesucht werden ➤ Wegeketten bedeuten in etwa 12% aller Fälle eine bessere Erreichbarkeit von Supermärkten
43	Wieland & Dittich (2016) Gesundheitsregion Göttingen	Google-API über R, ggmap	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ ohne SWZ 	420 Ortsteile/ statistische Gebiete	<p>Reiseaufwandsindikatoren (949 Gesundheits-einrichtungen)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ eine steigende Spezialisierung der Ärzte führt zu einer höheren räumlichen Konzentration eine zu geringe räumliche Auflösung der Ergebnisse wird kritisch angemerkt
44	Wulforth et al. (2010) Europäische Metropolregion München	HAFAS PTV VISUM	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tür-zu-Tür ➤ ohne SWZ ➤ keine Fußwege von und zu den Haltestellen 	Verkehrszellen (Gemeinden und statistische Gebiete)	<p>Reiseaufwandsindikatoren Kumulationsindikatoren</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ umfassende multimodale Erreichbarkeitsanalysen auf Zellebene ➤ Aufbau eines Datenmodells mit langfristiger Entwicklungsmöglichkeit

Zahlreiche elementare Bedürfnisse werden außerhalb der eigenen Wohnung befriedigt. Dazu gehören der Besuch von Freunden und Bekannten, das Studium an der Universität und der Einkauf im Supermarkt. Ob Personen die Wege zu diesen Einrichtungen durchführen können, hängt ganz wesentlich von der Erreichbarkeit ab. Ihre herausragende Bedeutung in der öffentlichen Planung ist unbestritten. Gleichzeitig sind Erreichbarkeitsinstrumente in der praktischen Anwendung bisher keineswegs etabliert. Der Aufbau und die Pflege von Erreichbarkeitsmodellen erfordern ein fundiertes Fachwissen und insbesondere die Integration des öffentlichen Verkehrs stellt zahlreiche methodische Herausforderungen bereit. Eine personelle und finanzielle Überforderung potenzieller Anwender ist die Folge.

In dieser Arbeit werden anhand von 20 Nahverkehrsplänen aus der Metropolregion die Einsatzmöglichkeiten von Erreichbarkeitsinstrumenten aufgezeigt, gegenwärtige Hemmnisse diskutiert und methodische Herausforderungen erläutert. Anschließend wird ein Ansatz für den Aufbau eines regionalen Erreichbarkeitsmodells mit einer hohen Auflösung vorgeschlagen. Dabei liegt der besondere Fokus auf einer detaillierten Integration des öffentlichen Verkehrssystems. Aufbauend auf diesem Modell wird der Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Modellgenauigkeit untersucht. Den Abschluss bilden Empfehlungen für die räumliche Auflösung in Erreichbarkeitsmodellen in Abhängigkeit von der Detaillierung der Verkehrssysteme und den verwendeten Erreichbarkeitsindikatoren.