

Legende

RVB

Mittelzentren des RVB

Mittelzentrum

ÖV-Erreichbarkeiten jeder Haltestelle in den Mittelzentren RVB in Minuten

0-10

10-20

20-30

30-40

40-50

50-60

60-70

70-80

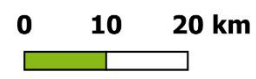
80-90

Kartengrundlage:

© OpenStreetMap

Datengrundlage: GTFS-Daten d

Connect GmbH



Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
Lehr- und Forschungsgebiet Güterverkehrsplanung und
Transportlogistik

Methoden zur Analyse der ÖPNV-Angebotsqualität mit
GTFS-Daten

Masterthesis

Verfasser: Marian Schlott
Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bert Leerkamp
Zweitgutachter: Akademischer Rat Tim Holthaus

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	METHODIK	2
3	THEORETISCHE ÜBERLEGUNGEN UND VORSTELLUNG DER UNTERSUCHUNGSRÄUME	4
3.1	ERREICHBARKEITSFORSCHUNG IN DER VERKEHRSPANUNG	4
3.2	GTFS-GESTÜTZTE ANALYSEN UND VERFAHREN DER ERREICHBARKEITSFORSCHUNG	5
3.3	DER LÄNDLICHE RAUM UND DAS KONZEPT DER ZENTRALEN ORTE	6
3.4	VORSTELLUNG DER UNTERSUCHUNGSGEBIETE	7
4	AUFBAU DES REISEZEITMODELLS	10
4.1	DATENGRUNDLAGEN.....	10
4.1.1	<i>GTFS-Daten</i>	11
4.1.2	<i>Aufbereitung der GTFS-Daten</i>	13
4.2	AUFBAU DES MODELLS.....	14
4.2.1	<i>OpenTripPlanner</i>	14
4.3	MODELLPARAMETER	15
5	ANALYSE DER ANGEBOTSQUALITÄT	17
5.1	ERSCHLIEßUNGSQUALITÄT.....	17
5.2	BEDIENUNGSQUALITÄT	19
5.3	ANWENDUNG DES CUM-INDEX.....	22
6	ANALYSE DER VERBINDUNGSQUALITÄT	25
6.1	ANALYSE DER VERBINDUNGSQUALITÄT NACH RIN 2008.....	25
6.2	EINE NEUE METHODIK ZUR ANALYSE DER VERBINDUNGSQUALITÄT	29
6.2.1	<i>Verfahren zur Wahl der Verbindungen</i>	30
6.2.2	<i>Wahl der Rasterzellengröße</i>	33
6.2.3	<i>Analyse der Verbindungen der VFS-III</i>	35
6.2.4	<i>Analyse der Verbindungen der VFS-II</i>	36
6.2.5	<i>Analyse kleinräumiger Verbindungen</i>	37
6.2.6	<i>Analyse großräumiger Verbindungen in Niedersachsen</i>	39
6.3	SCHÄTZUNG DER SAQ-KURVEN	41
6.4	VERGLEICH MIV	46
7	ZUSAMMENFASSUNG	52
7.1	AUSBLICK	53
8	LITERATURVERZEICHNIS	55
9	ANHANG	I
9.1	REISEZEITVERTEILUNGEN.....	I
9.1.1	<i>Reisezeitverteilungen der Grundzentren in der Region Großraum Braunschweig</i>	i
9.1.2	<i>Reisezeitverteilungen der Grundzentren in der Region Großraum Braunschweig</i>	i

9.1.3	<i>Reisezeitverteilungen der Grundzentren des MDV</i>	ii
9.1.4	<i>Reisezeitverteilungen der Mittelzentren des MDV</i>	ii
9.2	DICHTEFUNKTIONEN DES REISEZEITVERHÄLTNISES	III
9.2.1	<i>Reisezeitverhältnis der Grundzentren in der Region Großraum Braunschweig</i>	iii
9.2.2	<i>Reisezeitverhältnis der Mittelzentren in der Region Großraum Braunschweig</i>	iii
9.2.3	<i>Dichtefunktionen der Reisezeitvergleiche der Grundzentren des MDV</i>	iv
9.2.4	<i>Dichtefunktionen der Reisezeitvergleiche Mittelzentren des MDV</i>	iv

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1 METHODISCHES VORGEHEN ZUR ERMITTLUNG VERBINDUNGSBEZOGENER KENNGRÖßEN	2
ABBILDUNG 2 DARSTELLUNG DES RVB UND EINWOHNERVERTEILUNG DES RVB AUF EINEM GITTER MIT 300 M KANTENLÄNGE	7
ABBILDUNG 3 DARSTELLUNG DES MDV UND EINWOHNERVERTEILUNG DES MDV AUF EINEM GITTER MIT 300 M KANTENLÄNGE	8
ABBILDUNG 4 DARSTELLUNG DES GTFS-DATENMODELLS IN ANLEHNUNG AN GIDAM ET AL. (2020; IABLONOVSKI)	12
ABBILDUNG 5 GRAPHISCHE DARSTELLUNG DER REISEZEIT	15
ABBILDUNG 6 DURCHSCHNITTLICHE FUßWEITEN JE 300 GITTERZELLE ZU DEN HALTESTELLEN DES ÖV IM RVB UND IM MDV	18
ABBILDUNG 7 SUMMENHÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ERREICHBAREN HALTESTELLEN IN DER MORGENDLICHEN HVZ IN ANLEHNUNG FAYYAZ ET AL. (2017)	19
ABBILDUNG 8 TAGESGANGLINIEN DES ÖV FÜR DEN MDV UND DEN RVB WERKTAGS	20
ABBILDUNG 9 ANZAHL DER ABFAHRTEN JE 1KM-GITTERZELLE IN DER MORGENDLICHEN HAUPTVERKEHRSZEIT AN EINEM WERKTAG IM RVB UND MDV	21
ABBILDUNG 10 SUMMENHÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ABFAHRTEN JE GITTERZELLE MIT 1 KM KANTENLÄNGE DIFFERENZIERT NACH DER ZENTRUMSART	21
ABBILDUNG 11 ANWENDUNG DES EMPFOHLENE FARTENANGEBOTS DES VDV IN DER NORMALVERKEHRSZEIT IM RVB UND IM MDV	22
ABBILDUNG 12 ERREICHBARE ZELLEN JE BEWOHNTER 1HA-GITTERZELLE DES RVB UND MDV	23
ABBILDUNG 13 SUMMENHÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ERREICHBAREN FLÄCHE IN HA JE GITTERZELLE MIT 100 KANTENLÄNGE DIFFERENZIERT NACH DER ZENTRUMSART	24
ABBILDUNG 14 EINWOHNERVERTEILUNG DER ERREICHBAREN GITTERZELLEN JE 1 HA-GITTERZELLE	24
ABBILDUNG 15 BEISPIELHAFTE DARSTELLUNG DER IDENTIFIZIERUNG DER ERSTEN NACHBARBEZIEHUNGEN DER GZ AM BEISPIEL DER GEMEINDE BADDECKENSTEDT	26
ABBILDUNG 16 BEISPIELHAFTE DARSTELLUNG DER NACHBARSCHAFTSBEZIEHUNGEN AM BEISPIEL DER GEMEINDE BADDECKENSTEDT	27
ABBILDUNG 17 VERTEILUNG DER ERMITTELTEN SAQ-KURVEN FÜR DIE GZ-GZ/GZ-MZ-RELATIONEN NACH RIN 2008-METHODIK IM RVB UND MDV	28
ABBILDUNG 18 VERTEILUNG DER ERMITTELTEN SAQ-KURVEN FÜR DIE MZ-MZ/MZ-OZ-RELATIONEN NACH RIN-METHODIK IM RVB UND MDV	29
ABBILDUNG 19 ALTERNATIVMETHODE ZUR ERMITTLUNG DER SAQ-BEWERTUNGEN IN ANLEHNUNG AN HOLTHAUS (O.J.)	30
ABBILDUNG 20 VERGLEICH DER SUMMENVERTEILUNGEN DES VERHÄLTNISSES ZWISCHEN FAHR- ZU REISEZEIT	31
ABBILDUNG 21 SUMMENHÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER ANZAHL DES VERHÄLTNISSES ZWISCHEN FAHR- UND REISEZEIT FÜR DIE VFS III IM MDV UND RVB	33
ABBILDUNG 22 GEGENÜBERSTELLUNG DER FAHRZEITEN UNTERSCHIEDLICHER GITTERGRÖßEN FÜR DIE ZUFALLSRELATIONEN, SOWIE DIE RELATIONEN ZWISCHEN GOSLAR UND DEM CAMPUS DER TU BRAUNSCHWEIG	34
ABBILDUNG 23 GEGENÜBERSTELLUNG DER REISEZEITEN UNTERSCHIEDLICHER GITTERGRÖßEN FÜR DIE ZUFALLSRELATIONEN, SOWIE DIE RELATIONEN ZWISCHEN GOSLAR UND DEM CAMPUS DER TU BRAUNSCHWEIG	35
ABBILDUNG 24 VERTEILUNG DER ERMITTELTEN SAQ-KURVEN DER VFS-III NACH NEUER METHODIK IM RVB UND MDV	36
ABBILDUNG 25 VERTEILUNG DER ERMITTELTEN SAQ-KURVEN DER VFS-II NACH NEUER METHODIK IM RVB UND MDV	36
ABBILDUNG 26 MODELLHAFTE DARSTELLUNG DES RASTERZELLENBASIERTE UMLEGUNGSMODELLS	37
ABBILDUNG 27 RELATIVER ANTEIL DER DIREKTVERBINDUNGEN IN DEN STÄDTEN BRAUNSCHWEIG UND HALLE (SAALE)	38
ABBILDUNG 28 VERHÄLTNISSWERT AUS SUMME ALLER ERREICHBAREN ZIELZELLEN INKLUSIVE ANZAHL DER FAHRTEN, DIE DAS KRITERIUM ERFÜLLEN ZU ALLEN ZIELZELLEN * 20	39
ABBILDUNG 29 KENNWERTE DER MEDIAN-LUFTLINIENGESCHWINDIGKEIT FÜR ALLE VERBINDUNGEN IN BRAUNSCHWEIG UND HALLE (SAALE)	39
ABBILDUNG 30 RÄUMLICHE VERTEILUNG DER AGGREGIERTEN REISEZEITEN ZU DEM CAMPUS DER TU BRAUNSCHWEIG	40
ABBILDUNG 31 KENNWERTE DER SCHNELLSTEN LUFTLINIENGESCHWINDIGKEIT FÜR ALLE VERBINDUNGEN JEDER BEWOHNTE 1HA- GITTERZELLE ZUM CAMPUS DER TU BRAUNSCHWEIG	41
ABBILDUNG 32 WERTEBEZIEHUNGEN ZWISCHEN LUFTLINIENENTFERNUNG UND LUFTLINIENGESCHWINDIGKEIT FÜR DIE VFS II UND III	42

ABBILDUNG 33 WERTEBEZIEHUNGEN ZWISCHEN LUFTLINIENENTFERNUNG UND LUFTLINIENGESCHWINDIGKEIT FÜR DEN MIV ZWISCHEN ALLEN BEWOHNTEN GITTERZELLEN UND DEM CAMPUS DER TU BRAUNSCHWEIG.....	43
ABBILDUNG 34 ERMITTLUNG DER ANGEBOTSQUALITÄT BEI DER ERSCHLIEßUNG MIT DEM ÖV IN NRW, GROß (2021)	43
ABBILDUNG 35 RESULTIERENDE SAQ-KURVEN FÜR DIE VFS-II UND III.....	44
ABBILDUNG 36 RESULTIERENDE SAQ-KURVEN FÜR DIE STÄDTE BRAUNSCHWEIG UND HALLE (SAALE).....	46
ABBILDUNG 37 REISEZEITVERHÄLTNIS ÖPNV/MIV, (VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN E.V. (VDV) 2019)	47
ABBILDUNG 38 DARSTELLUNG DER GRAVITATIONSBASIERTE POTENTIALINDIKATORFUNKTION FÜR DEN MIV IM REGIONALVERBAND GROßRAUM BRAUNSCHWEIG, NACH (HESSE ET AL. 2012)	48
ABBILDUNG 39 RÄUMLICHE VERTEILUNG DES REISEZEITVERHÄLTNISSES ZWISCHEN ALLEN BEWOHNTEN GITTERZELLEN IN DER STADT BRAUNSCHWEIG.....	49
ABBILDUNG 40 SUMMENHÄUFIGKEITSVERTEILUNGEN DER REISEZEITVERHÄLTNISSE DER VFS II UND III.....	50
ABBILDUNG 41 WERTEBEZIEHUNGEN DES REISEZEITVERHÄLTNISSES UND DER LUFTLINIENENTFERNUNG FÜR DIE VERBINDUNGEN DER VFS-II UND III	51

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1 DATEN EINES BEISPIELHAFTEN GTFS-FEEDS (GTFS TRANSIT FEED SPECIFICATION 2022) 12

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AT	Aufgabenträger
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
CUM	Cumulative-opportunity
GIS	Geoinformationssystem
GTFS	General Transit Feed Specification
GRAV	Gravity-type
GZ	Grundzentrum
HVZ	Hauptverkehrszeit
JSON	JavaScript Object Notation
MDV	Mitteldeutscher Verkehrsverbund
mIV	motorisierter Individualverkehr
MKRO	Ministerkonferenz für Raumordnung
MZ	Mittelzentrum
NVZ	Nebenverkehrszeit
OSM	OpenStreetMap
OTP	OpenTripPlanner
OZ	Oberzentrum
POI	Points of Interest
RIN 2008	Richtlinien für integrierte Netzgestaltung
ROG	Raumordnungsgesetz
RVB	Regionalverband Großraum Braunschweig
SAQ	Stufen der Angebotsqualität
SWZ	Startwartezeit
VDV	Verband deutscher Verkehrsunternehmen e. V.
VFS	Verbindungsfunktionsstufe
WATT	Weighted Average Travel Time
ZO	Zentrale Orte

1 Einleitung

Die Berechnung der Angebotsqualität ist eine bewährte Methode in der Verkehrsplanung. Mit den RIN 2008 (Richtlinien für integrierte Netzgestaltung) liegt ein Regelwerk vor, welches auf Grundlage von Kenngrößen Verkehrsnetze bewertet und klassifiziert. Damit liegt ein Planungskonzept und eine -methodik vor, die auf Grundlage von raumordnerischen Konzepten Zielvorgaben zur Erreichbarkeit zentraler Orte formuliert. Daneben kann in der fachwissenschaftlichen Literatur zur Qualitätsbewertung des öffentlichen Verkehrs (ÖV) durch den vermehrten Einsatz sogenannter General Transit Feed Specification (GTFS)-Daten eine methodische Erneuerung beobachtet werden. Unter GTFS wird dabei eine Spezifikation verstanden, die den Sollfahrplan eines ÖV-Systems abbildet.

Diese Erneuerung geht Hand in Hand mit der Entwicklung open source basierter Tools zur Berechnung von Reise- und Fahrzeiten des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV).

Die vorliegende Thesis zielt daher darauf ab, auf Grundlage von GTFS-Daten und eines open source Tools zur Berechnung von Reisezeiten, neue methodische Ansätze zu erproben. Der vorliegenden Arbeit liegt dabei die Forschungsthese zugrunde, dass durch neue Rechnerkapazitäten und die Zugänglichkeit von Sollfahrplänen eine aktualisierte Bewertungsmethodik der RIN entwickelt werden kann. Erste Ansätze bei der Anwendung der Methodik mit GTFS-Daten sollen in dieser Arbeit erprobt werden. Ein Ziel liegt darin, realistischere Reisezeiten bereitzustellen, die eine bessere Abbildung der Angebotsqualität im ländlichen Raum ermöglichen.

2 Methodik

Angestoßen durch die eingangs formulierten Fragestellungen der GTFS-gestützten Analyse der Angebotsqualität des ÖPNV zielt diese Arbeit auf die Entwicklung und Nutzbarmachung methodischer Verfahren zur Abbildung des ÖPNV in zwei Vergleichsregionen ab. Durch die Anwendung der Methoden in zwei Regionen kann zum einen ein Vergleich zwischen den Angebotsqualitäten der ÖV-Systeme gezogen werden, andererseits können so die angewandten Methoden auch in einer anderen Region erprobt und übertragen werden. Inhaltlich lässt sich die vorliegende Arbeit in zwei Hauptuntersuchungen unterscheiden. Im ersten Teil der Arbeit werden Kenngrößen untersucht, die unmittelbar aus GTFS-Daten ableitbar sind. Es werden also Angebotsqualitäten berechnet, um beide Untersuchungsräume hinsichtlich der Erschließungs- und Bedienungsqualität zu vergleichen.

Im zweiten Teil der Arbeit werden die Methoden der RIN angewendet. Die Ermittlung der reisezeitbezogenen Kenngrößen kann Abbildung 1 entnommen werden. Das methodische Vorgehen ist insbesondere für den zweiten Teil der vorliegenden Thesis relevant, lässt sich aber in den Grundzügen auch für weitere Kriterien nutzbar machen. Zur Ermittlung der Kenngrößen wird ein Reisezeitmodell benötigt. Um die erzeugten Matrizen umzulegen, wird in Python ein Skript entwickelt, welches neben der Parallelisierung der Abfragen der API-Schnittstelle auch in anderen Threads zeitgleich die abgefragten Daten effizient in eine in PostgreSQL implementierten Datenbank speichert. Durch die Speicherung der Daten in eine Geoinformationssystem (GIS)-Datenbank können diese unmittelbar ausgewertet werden. Die Parallelisierung der Abfragen zur Ermittlung der Kenngrößen ist notwendig, um die großen Verbindungen effizient umlegen zu können. Benchmarks haben gezeigt, dass der OpenTripPlanner (OTP) 50.000 Abfragen pro Stunde berechnen kann. Diese Anzahl wird durch die hardwarebedingte Ausstattung des Servers nicht erreicht, aber eine ausreichende Effizienz kann hergestellt werden, um sehr große Matrizen umzulegen.

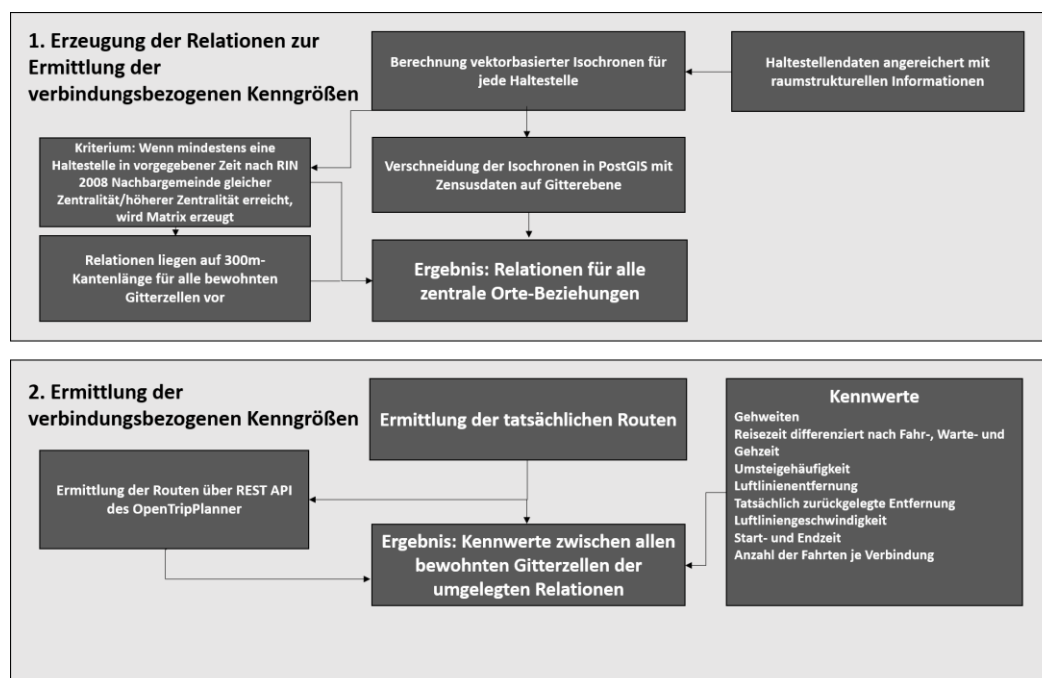


Abbildung 1 Methodisches Vorgehen zur Ermittlung verbindungsbezogener Kenngrößen

Das in Abbildung 1 vorgestellte Vorgehen unterscheidet sich hinsichtlich der Methodik der RIN dahingehend, dass keine Nachbarschaftsbeziehungen zur Untersuchung der Kenngrößen vorausgesetzt werden, sondern dass solche Relationen untersucht werden, welche innerhalb einer vorgegebenen Zeit erreicht werden können. So greift dieser methodische Ansatz die in der RIN durch die Ministerkonferenz Raumordnung (MKRO) definierten Zielgrößen für die Erreichbarkeit der zentralen Orte (ZO) auf.

Als Ergebnis liegen für alle Relationen kleinräumige und feine Informationen vor, die zur Berechnung weiterer Kenngrößen verwendet werden können.

3 Theoretische Überlegungen und Vorstellung der Untersuchungsräume

Im folgenden Kapitel sollen theoretische Konzepte eingeführt werden, welche wesentlich für die vorliegende Arbeit sind. Dabei werden neben der Erläuterung des Begriffs der Erreichbarkeit auch eine kurze Einführung in die Literatur GTFS-basierter Analysen erfolgen. Darüber hinaus werden in aller Kürze einige Überlegungen zur Abgrenzung des ländlichen Raums zu anderen Raumtypen gezogen und das Konzept der zentralen Orte umrissen. Schlussendlich werden wichtige Hinweise zu den beiden Untersuchungsgebieten gegeben.

3.1 Erreichbarkeitsforschung in der Verkehrsplanung

Eine allgemeine Bestimmung des Begriffs der Erreichbarkeit ist in der Forschungsliteratur nicht eindeutig definiert, sondern besteht in einem komplexen Zusammenspiel unterschiedlicher Ziele und Fragestellungen. Ein Blick in die einschlägige Literatur offenbart die Herausforderung zur allgemeinen Beschreibung des Konzepts. Bei Hesse et al. (2012) findet sich die Darstellung der Erreichbarkeit als eine räumlich aggregierte Betrachtung. Erreichbarkeit beschreibt demnach die Zugänglichkeit von Orten in aggregierter Form. Die vorliegende Arbeit bemüht sich um eine einfache Definition, die sachlich beschreibbar und räumlich abgrenzbar ist. Es werden Ansätze benötigt, die den Begriff der Erreichbarkeit zwecks Vergleichbarkeit numerisch quantifizieren und vergleichbar machen.

Nachfolgend werden die zwei wesentlichen Ansätze der Erreichbarkeitsmodellierung gegenübergestellt. Dabei spielen für den ersten Teil der Analysen die sogenannten Cumulative-Opportunative (CUM)-Indices eine Rolle. Im zweiten Teil der Arbeit werden dann die gravitationsbasierten Ansätze untersucht, die im Folgenden als Gravity-Type (GRAV) bezeichnet werden und als Summe zwischen allen Quellen und Zielen beispielsweise die Reisezeiten gewichten.

Erreichbarkeitsindikatoren verwenden im Allgemeinen als Widerstand die Distanz, die Reisezeit oder die Transportkosten zwischen räumlich dispersen Quellen und Zielen. Kwan (1998) beschreibt zwei Arten von Erreichbarkeitsmaßen, die in der Erreichbarkeitsforschung angewandt werden. (vgl. dazu auch Wessel und Farber (2019), Ahlmeyer und Wittowsky (2018), Fayyaz et al. (2017))

Kwan (1998) differenziert zwischen den GRAV und CUM-Indices. Erstere gewichten die Möglichkeiten innerhalb eines Raums bzw. Untersuchungsgebiets und messen den Widerstand für jede Option (Attraktion/Ziel). GRAV-Ansätze gewichten die möglichen Ziele mit einer Kostenfunktion, die häufig in Form der Reisezeit¹ t_{ij} . (Kwan 1998; Fayyaz et al. 2017) CUM-Indices beschreiben für eine Quelle die Erreichbarkeit in Form einer Summe, welche die Anzahl an Optionen (Attraktionen/Ziele) innerhalb einer vorgehenden Zeit beschreibt. (Kwan 1998) Diese Indikatoren lassen sich den konventionellen Erreichbarkeitsindikatoren zuordnen und können auch als Potentialindikatoren zusammengefasst werden. In ihrer allgemeinen Form werden sie aus dem Newtonschen Gravitationsansatz des 4-Phasen Algorithmus der Verkehrsmodellierung

¹ Die Reisezeit wird zudem synonym mathematisch auch in Anlehnung an die RIN als $t_{Reisezeit}$, wobei Reisezeit in beiden Darstellungen die ganze Fahrtenkette adressiert.

abgeleitet. Erreichbarkeit wird demnach als die Summe aller Widerstände multipliziert mit dem Potential am Zielort verstanden. (Hesse et al. 2012)

Widerstandsfunktionen, die im Folgenden subsumiert werden unter dem Begriff GRAV, gibt es in unterschiedlichen Erscheinungsformen. Für die vorliegende Arbeit genügt die knappe Einführung der unterschiedlichen Widerstandsfunktionen. Eine umfangreiche Gegenüberstellung findet sich bei Hesse et al. (2012)

3.2 GTFS-gestützte Analysen und Verfahren der Erreichbarkeitsforschung

Nachdem der Begriff der Erreichbarkeit sowie die zwei vornehmlichen Ansätze skizziert worden sind, wird im Folgenden ein kurzer Überblick über GTFS-basierte Forschungsarbeiten geliefert. An dieser Stelle kann vorweggenommen werden, dass in der Planungspraxis bis jetzt keine umfangreiche Nutzbarmachung GTFS-basierter Planungsinstrumente beobachtet werden kann. Als ein Beispielprojekt aus der Planungspraxis sei an das multimodale Mobilitätskonzept in der Grafschaft Bentheim erinnert. (Leerkamp et al. 2021) Die nachfolgend skizzierten Arbeiten sind überwiegend sowohl aus dem europäischen als auch dem angelsächsischen Raum. Diese Feststellung ist nicht trivial, da die Forschungsfragen zwischen beiden Kontinenten divergieren. Amerikanische Forschungsvorhaben zielen oft darauf ab, Segregation zwischen demographischen Gruppen mittels einer Erreichbarkeitsanalyse sichtbar zu machen. Die Forschungsintention differiert demnach denen der vorliegenden Fragestellung.

Gidam et al. (2020) geben in ihrer Übersichtsarbeit Hinweise zur Modellierung der Erreichbarkeiten des ÖV durch einen GTFS-gestützten Ansatz. Sie zeigen einerseits, dass sowohl einfache Erreichbarkeitsindikatoren als auch komplexere Indices möglich sind und andererseits, dass durch GTFS-basierte Analysen auch Fragen der Wahrscheinlichkeiten diskutiert werden können. So zeigt eine Anpassung der Startzeitpunkte in eng getakteten Intervallen, dass die Erreichbarkeit zwischen den Zeitpunkten der Abfragen variiert. Somit wird die klassische Fragestellung, zu welchen Zeitpunkten können Ziele erreicht werden, um die Frage erweitert, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ziel erreicht werden kann. (Gidam et al. 2020)

Sujit Kumar Sikder et al. (2020) werten die GTFS-Daten des mitteldeutschen Verkehrsverbundes (MDV) hinsichtlich der Erschließung und der Bedienungshäufigkeit aus und liefern Hinweise zur Untersuchung der Bedienungsqualität über sozialwissenschaftliche Kenngrößen. So vergleichen sie für unterschiedliche Raumtypen die Bedienungshäufigkeit mittels des Gini-Koeffizienten.

Da GTFS eine weltweit zur Anwendung kommende Datenspezifikation ist, sind auch interkontinentale Vergleiche zwischen den Reisezeiten des motorisierten Individualverkehrs (mIV) und des ÖV möglich. Liao et al. (2020) entwickeln einen Modellansatz, um Reisezeiten des ÖV in verschiedenen Ländern GTFS-gestützt zu berechnen und zeigen, dass sich Reisezeitsdisparitäten zwischen unterschiedlichen Ländern und Städten ähneln. Palonen und Viri (2019) entwickeln Methoden zur Berechnung von Angebotsqualitäten aus GTFS-Daten und stellen einen Vergleich zwischen europäischen Städten dar.

In der englischsprachigen Literatur zielen Erreichbarkeitsanalysen häufig darauf ab, inwieweit gesellschaftliche Minderheiten verkehrlich von Einrichtungen der Daseinsvorsorge ausgegrenzt werden. Durch eine bessere und kleinräumigere Aufbereitung soziodemographischer Daten sind diese Analysen möglich. (Kaeoruean et al. 2020)

Umfangreiche Hinweise zur Analyse von GTFS-Daten finden sich bei Wessel und Farber (2019), die aus Echtzeitdaten im Vergleich zu statischen GTFS-Daten Kenngrößen zur Beschreibung der Genauigkeit, respektive Zuverlässigkeit liefern.

Die Sichtung der Literatur zeigt darüber hinaus, dass die GTFS-gestützte Analyse überwiegend Städte bzw. Regionen (deutschsprachiger Raum) oder Wirkbereiche von Verkehrsverbänden (englischsprachige Literatur) untersucht und dabei vorwiegend Fragen zur Erschließung bzw. Erreichbarkeit von Einrichtungen der Daseinsvorsorge untersuchen, jedoch keine relationsbezogenen Analysen der RIN 2008 angewandt werden.

3.3 Der ländliche Raum und das Konzept der zentralen Orte

Die Beschreibung des ländlichen Raums hat sich in der wissenschaftlichen Diskussion kontinuierlich gewandelt. So konnte vor 100 Jahren eine Abgrenzung zum städtischen Raum hinsichtlich der Siedlungs-, Wirtschafts- und Sozialstruktur gezogen werden. Angesichts der Vielfalt ländlicher Räume in Bezug auf sozioökonomische Faktoren, divergierender Lebensstile, die Intensität der Flächennutzung und Infrastrukturausstattung ergeben sich unterschiedliche Fragen zur Definition des ländlichen Raums. (Küpper 2016)

Eine Gegenüberstellung verschiedener Begriffsbestimmungen findet sich bei Franzen et al. (2008). Die Autoren zeigen, dass oftmals eine Abgrenzung gegenüber des städtischen Raums gezogen wird. Für die Verkehrsplanung erfolgt eine Annäherung oftmals über die Beschreibung der Raumstruktur. Der Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VD) beispielsweise grenzt Raumtypen über Nutzungsdichten ab. (Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) 2019) In den Raum- und Verkehrswissenschaften findet eine Typisierung der Räume über siedlungsstrukturelle Merkmale statt. Als Faustregel gilt, dass die Ländlichkeit mit abnehmender Siedlungsdichte steigt. Für die vorliegende Arbeit ist eine Begriffsbestimmung insoweit sinnvoll, da beide Untersuchungsräume als überwiegend ländlicher Raum klassifiziert werden können. Auch aus Sicht des ÖV stellt der ländliche Raum eine Herausforderung und Chance zugleich dar. In früheren Jahren konnte ein starker Bevölkerungsrückgang im ländlichen Raum beobachtet werden, welcher nicht nur Effekte auf die Strukturstärke einer Region ausübt, sondern auch unmittelbar zu sinkenden Fahrgastzahlen des ÖV führt. Im Gegensatz dazu kann heute eine Stabilisierung der Bevölkerungszahlen im ländlichen Raum beobachtet werden, woraus sich Chancen für die Betreiber des ÖV ergeben. (Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) 2019)

Werden Fragen des ÖV im ländlichen Raum diskutiert, so zielen diese häufig auf eine Sicherstellung der Daseinsvorsorge ab. Eine entscheidende Rolle kommt dies bezüglich den ZO zu, was nachfolgend skizziert werden soll. Das System der zentralen Orte ist im geltenden Raumordnungsgesetz (ROG) des Bundes verankert und zielt darauf ab, das Postulat der Gleichwertigkeit der Lebensverhältnisse zu verwirklichen. Das Konzept erfährt seit einigen Jahren einen Bedeutungszuwachs durch die Zunahme veränderter räumlicher Rahmenbedingungen. (Spangenberg 2008) Seit jeher wird in der Literatur diskutiert, welchen Beitrag das Konzept heutzutage noch zur Schaffung gleichwertiger Lebensverhältnisse leistet. So heißt es bereits in den 90ern, dass die zentralörtliche Gliederung nur noch unter dem Deckmantel der Fortschreibung bestehender Siedlungsstrukturen geschehe. (Deiters 1996) Für die Verkehrsplanung ist das Konzept der zentralen Orte für die Verkehrsnetzgestaltung zwischen ZO relevant. In den RIN kann die Verzahnung zwischen Raum- und Verkehrsplanung beobachtet werden. (Vallée)

3.4 Vorstellung der Untersuchungsgebiete

Im Folgenden werden die beiden Untersuchungsräume vorgestellt. Der Regionalverband Großraum Braunschweig (RVB) liegt im Osten Niedersachsens an der Grenze zu Sachsen-Anhalt und ist Teil der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen-Wolfsburg. (Regionalverband Großraum Braunschweig 2019)

Der RVB ist ein Aufgabenträger (AT) für den ÖPNV und Schienenpersonennahverkehr (SPNV) im Großraum Braunschweig. Zusätzlich erfüllt er die Aufgabe der unteren Landesplanungsbehörde. Er stellt ebenfalls den Nahverkehrsplan für das Gebiet auf. Der Zuständigkeitsbereich umfasst die Landkreise Gifhorn, Peine, Helmstedt, Wolfenbüttel und Goslar, sowie die Städte Wolfsburg, Braunschweig und Salzgitter. (Braunschweig 2022)

In Abbildung 2 ist der Zuständigkeitsbereich des RVB dargestellt. Die großen Städte Salzgitter, Braunschweig und Wolfsburg bilden die Oberzentren des Gebietes. Sie besitzen in ihrem Einzugsbereich größtenteils eine dichte Wohnbevölkerung. Die Orte Wittingen, Gifhorn, Peine, Helmstedt, Seesen, Goslar, Bad Harzburg und Clausthal-Zellerfeld bilden die Mittelzentren, in denen meist ein klares Mittelzentrum mit der höchsten Einwohnerdichte zu erkennen ist. Über das restliche Gebiet erstrecken sich Grundzentren und Orte ohne zentralörtliche Funktion. Diese sind meist recht dünn besiedelt. Da die meisten Menschen im Ortszentrum leben, lassen sich auch kleinere Orte an der Wohnbevölkerung auf der Karte ausmachen. Diese Zentren haben in der Regel eine geringere Wohnbevölkerung als die Ortskerne der großen Städte wie Wolfsburg.

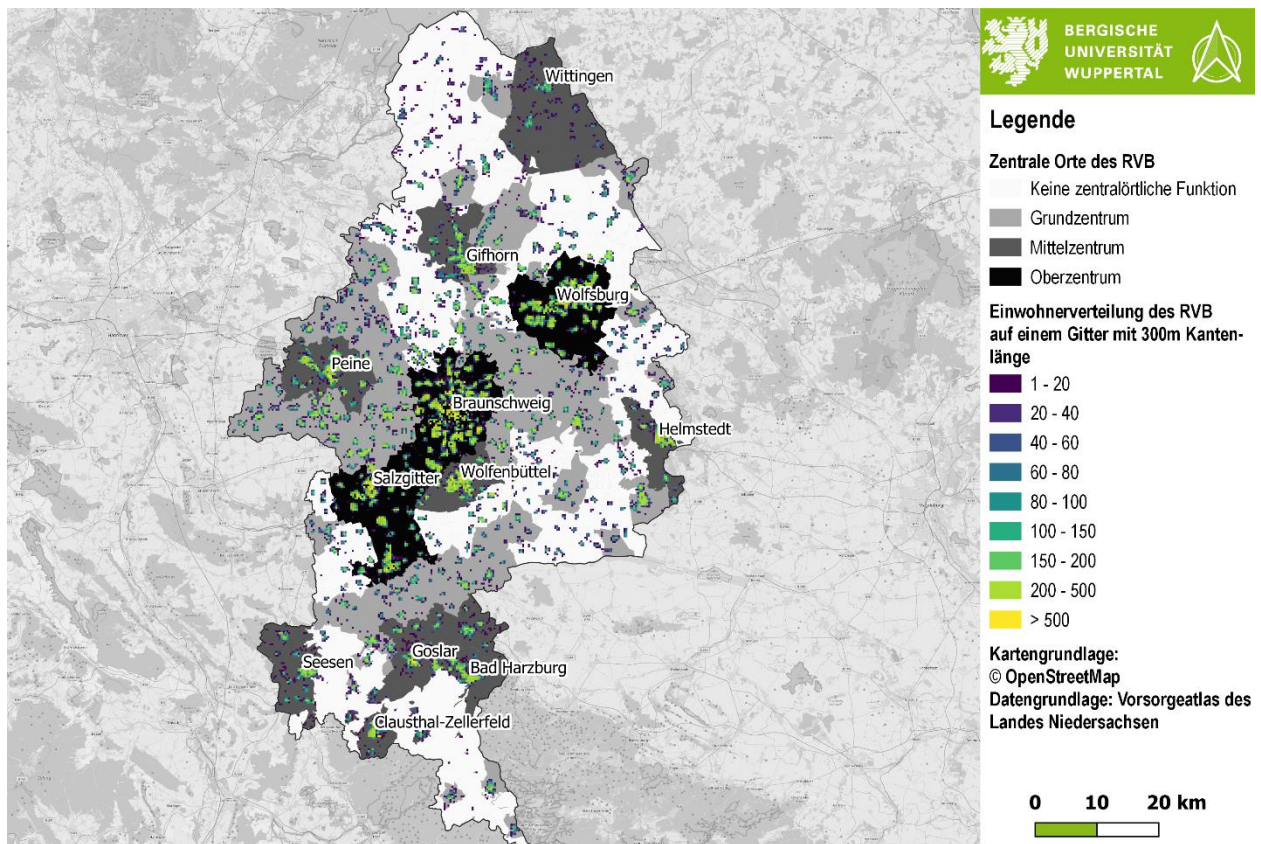


Abbildung 2 Darstellung des RVB und Einwohnerverteilung des RVB auf einem Gitter mit 300 m Kantenlänge

Der MDV ist im Gegensatz zum RVB keine regionale Planungsbehörde, sondern ein Verkehrsverbund, der mehrere Regionalplanungsbehörden vereint. Der Zuständigkeitsbereich liegt zwischen den drei Bundesländern Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen und umfasst die beiden Städte Leipzig und Halle (Saale), sowie weiteres Umland in allen drei Bundesländern. Unter dem Schirm des MDV agieren zurzeit etwa 20 Nahverkehrsunternehmen. In dem zuständigen Raum können Fahrgäste mit einem Ticket (1-Ticket-Prinzip) alle Verkehrsmittel nutzen. (Werner 2014)

Der Zuständigkeitsbereich des MDV ist in Abbildung 3 dargestellt. Besonders relevant für die Arbeit sind die Grund-, Mittel- und Oberzentren. Mit Leipzig und Halle (Saale) existieren zwei Oberzentren (OZ) im MDV. Erkennbar ist, dass diese beiden Städte in ihren Einzugsgebieten eine große Anzahl an Einwohnern vereinen und damit auch in ihrer Funktion als OZ klar erkennbar sind. Des Weiteren besitzt der Planungsraum viele Mittelzentren (MZ). Dazu gehören die Städte Torgau, Delitzsch, Eilenburg, Wurzen, Oschatz, Grimma, Schkeuditz, Markkleeberg und Borna in Sachsen, Lucka, Meuselwitz und Altenburg in Thüringen, sowie Zeitz, Naumburg (Saale), Weißenfels und Merseburg in Sachsen-Anhalt. Auch an diesen Orten ist eine höhere Einwohnerdichte zu erkennen mit geringeren Dichten am Rand der Städte. Eine Besonderheit ist im Raum zwischen Zeitz und Markkleeberg zu erkennen. Die ansässigen Orte verlaufen nord-östlich in einer geraden Linie zwischen den beiden Städten. Dies könnte mit dem ansässigen Tagebau Profen zusammenhängen. Oftmals müssen Einwohner in der Umgebung von Braunkohlewerken umgesiedelt werden, da die Orte dem Abbau weichen müssen.

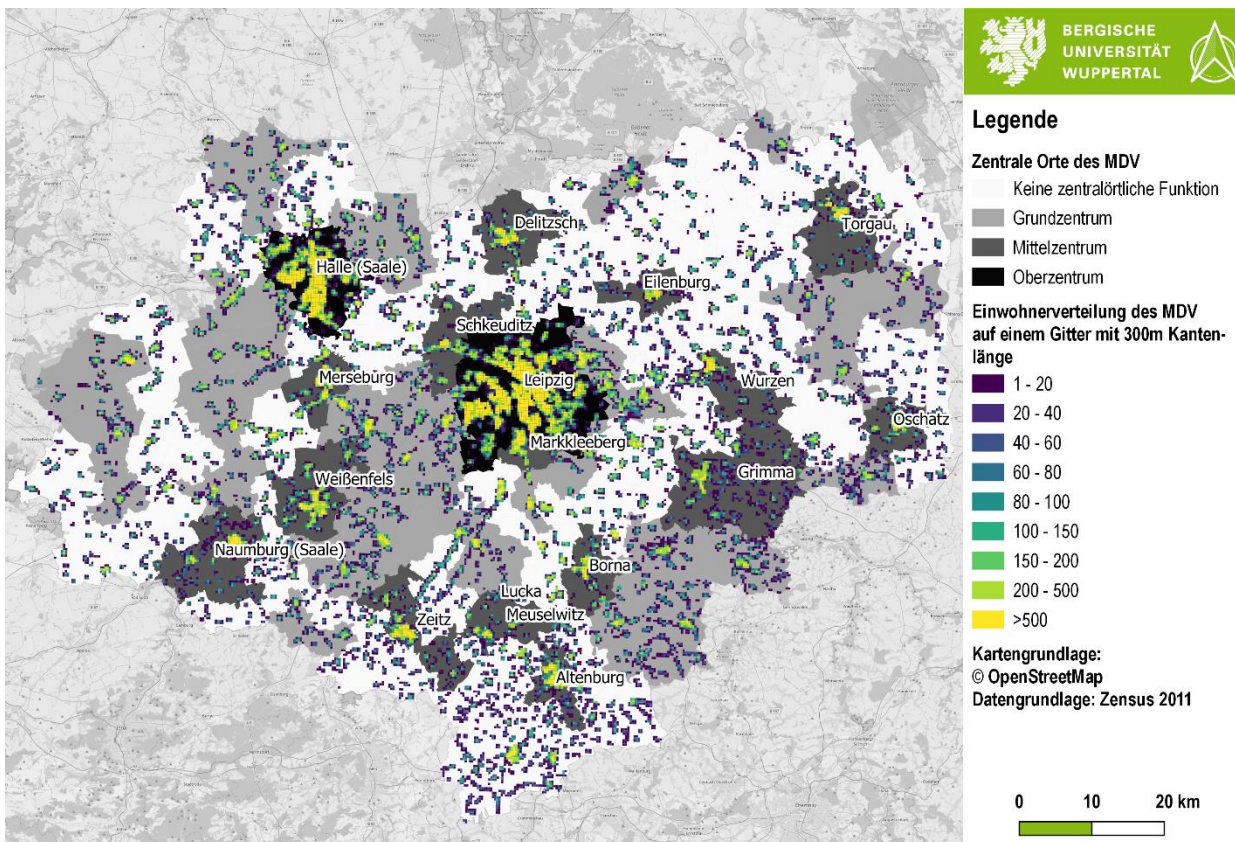


Abbildung 3 Darstellung des MDV und Einwohnerverteilung des MDV auf einem Gitter mit 300 m Kantenlänge

Über das restliche Gebiet sind noch weitere Grundzentren (GZ) verstreut. Die Ortsnamen sind nicht weiter dargestellt, jedoch lässt sich anhand der Einwohnerverteilung erkennen, wo Ortszentren liegen. Kleinere Städte sind durch eine geringere Verteilung gut sichtbar. Diese befinden sich über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt. Auch die Bereiche, die keine zentralörtliche Funktion besitzen, sind mit kleineren Dörfern und Städten besiedelt. Besonders in Sachsen gibt es viel dünn besiedelte Fläche, die keine zentralörtliche Funktion besitzt.

4 Aufbau des Reisezeitmodells

Zur modellhaften Abbildung der Reisezeiten wird ein Umlegungsmodell benötigt, welches rasterzellenscharf relationsbezogene Kennwerte berechnen kann. In der Erreichbarkeitsforschung werden je nach Methodik interpolierte Reisezeiten, oder rasterzellenbasierte Reisezeiten untersucht. Dieser methodische Blickwinkel muss aber zwingend die Umsetzbarkeit berücksichtigen, da es möglich sein muss, große Verflechtungen möglichst kleinräumig umzulegen. Neben der planerischen Abbildung, der technischen Umsetzbarkeit, muss die Dimension der Zugänglichkeit berücksichtigt werden, ebenso der open source orientierte Ansatz.

4.1 Datengrundlagen

Zur modellgestützten Abbildung der Erreichbarkeiten sind neben GTFS-Daten weitere Daten nötig, um die berechneten Kenngrößen beispielsweise räumlich zu modellieren. Es wird also ein kleinräumiges Datenmodell benötigt, welches sowohl als Medium zur Zuordnung der ermittelten Reisezeiten fungiert, aber auch weitere statistische Größen in Bezug zu den berechneten Werten setzen kann. In der Erreichbarkeitsforschung sind Rasterzellen² eine wichtige räumliche Bezugsebene, welche eine Aggregation räumlicher Daten ermöglicht. In Deutschland liegen Geogitter unterschiedlicher räumlicher Auflösung vor, die mit einigen grundlegenden Informationen angereichert sind. Das kleinräumigste ist die Gitterzelle mit 100m Kantenlänge. (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2020) Die Rasterzelle ist für das aufzubauende Modell essentiell, da sie die vorwiegende Analyseeinheit ist. Neben der Rasterzelle als geometrisches Objekt spielen Bevölkerungsdaten eine wichtige Rolle. In Deutschland liegt mit dem Zensus 2011 erstmalig ein Bevölkerungsmodell bereit, welches eindeutig über einen gemeinsamen Schlüssel mit den Rasterzellen verknüpfbar ist. Dies hat den Vorteil, dass die berechneten Größen mit Einwohnerdaten gewichtet werden können. Neben den Einwohnern liegen auch für die Geogrids die soziodemographischen Daten des Zensus vor, was eine Differenzierung der Analyse für unterschiedliche Bevölkerungs- und Altersklassen ermöglicht. (ZENSUS2011 - Bevölkerungs- und Wohnungszählung 2011 - Ergebnisse des Zensus 2011 zum Download - erweitert 2022)

Die Gitterzelle ist also eine räumliche Aggregationsebene, welche als Medium statistische Informationen darstellt. Da die Arbeit sehr kleinräumig Qualitätskriterien des ÖV berechnet, ergeben sich bei der Matrixbildung aus Rasterzellen mit einer Kantenlänge von 100 m rechnerische Herausforderungen. Die Datenaggregation ist ein etabliertes Verfahren in den Geo- und Verkehrswissenschaften. Um den Rechenaufwand bei der Umlegung der Quell-Zielbeziehungen zu reduzieren, wird ein Gitter mit 300 m Kantenlänge entwickelt. Um sich die Größenordnung zu vergegenwärtigen, sei folgendes Beispiel stellvertretend genannt. Für eine Quell-Zielbeziehung zweier Geogrids mit 300 m Kantenlänge würden 9 Verbindungen bei Gitterzellen mit 100 m Kantenlänge benötigt. Um den Rechenaufwand zu minimieren, wird als überwiegendes Bezugssystem die 300 m Gitterzelle verwendet.

Neben der Rasterzelle als Analyseeinheit sind Raumtypen die Untersuchungseinheiten dieser Arbeit. Zur räumlichen Abbildung und Differenzierung von Siedlungsräumen werden georeferenzierte administrative Grenzen sowie Siedlungsstrukturen benötigt, um Auswertungen hinsichtlich

² Geogitter, Gitterzelle, Gitter und Geogrid werden in der vorliegenden Arbeit synonym verwendet.

des Raumtyps sowie der räumlichen Auflösung vorzunehmen. Hervorzuheben sind dabei vor allem die ZO, die in der RIN entscheidend zur Verkehrsnetzgestaltung sind. Das zentrale-Orte-Konzept ist für die deutsche Raumordnung ein wichtiges Instrument zur räumlichen Organisation und Gewährleistung der Daseinsvorsorge. Durch das System der zentralen Orte soll in einer Region die Versorgung der Bevölkerung bzw. der Wirtschaft zu angemessenen Erreichbarkeitsbedingungen gewährleistet werden. Wie bereits eingeführt, werden die Regionen RVB und MDV untersucht. Für den RVB liegen die ZO gebündelt vor. (Regionalverband Großraum Braunschweig 2008)

Für den MDV liegen die ZO nicht gesondert vor, sondern müssen aus verschiedenen Quellen zusammengetragen werden. (Regionale Planungsgemeinschaft Halle 2019; Burgenlandkreis 2018; Freistaat Thüringen. Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz o. J.; Leibniz-Institut für Länderkunde 2017; Landkreis Nordsachsen 2010)

Die administrativen Grenzen können über die Seiten des Bundesamt für Kartographie und Geographie (BKG) bezogen werden und sind vor allem zur späteren Bestimmung der Nachbarschaftsbeziehungen relevant.

Um die räumliche Bezugsebene der Rasterzelle mit Informationen zu parametrisieren, werden zudem weitere räumliche Daten benötigt. Mit OpenStreetMap (OSM) liegt eine öffentlich zugängliche Datenbank vor, welche zur Identifizierung räumlicher Schwerpunkte zur Verfügung steht. Diese Daten werden in der vorliegenden Arbeit unter dem Begriff der Points of Interest (POI) subsumiert. Werden beispielsweise Anbindungsknoten für die RIN-Analyse benötigt, können die POI aus OSM verwendet werden.

Das Datenmodell zur kleinräumigen Analyse der Angebots- und Verbindungsqualität besteht im Kern aus der Rasterzelle als Analyseeinheit und Träger räumlich aggregierter Informationen, den ZO respektive Gemeinden, die geometrisch modelliert vorliegen und den POI zur Identifizierung räumlicher Schwerpunkte.

4.1.1 GTFS-Daten

Im Folgenden werden die Daten vorgestellt, die zum Aufbau des Modells wesentlich sind. Der Fokus liegt dabei schwerpunktmäßig auf den GTFS-Daten.

GTFS definieren ein allgemeines Format zur Beschreibung des Sollfahrplans eines ÖPNV-Systems. Ein GTFS-Feed ist eine Sammlung von Textdateien, welche in der Form einer relationalen Datenbank vorliegen und daher untereinander verknüpfbar sind. Jede Tabelle bildet den spezifischen Teil des ÖPNV-Systems ab. (Iablonovski 2020; Gidam et al. 2020) Abbildung 4 stellt den relationalen Zusammenhang dar und zeigt, über welche Schlüssel die Tabellen untereinander verknüpfbar sind. Außerdem ist Abbildung 4 zu entnehmen, welche Tabellen zur Beschreibung des ÖPNV nötig sind.

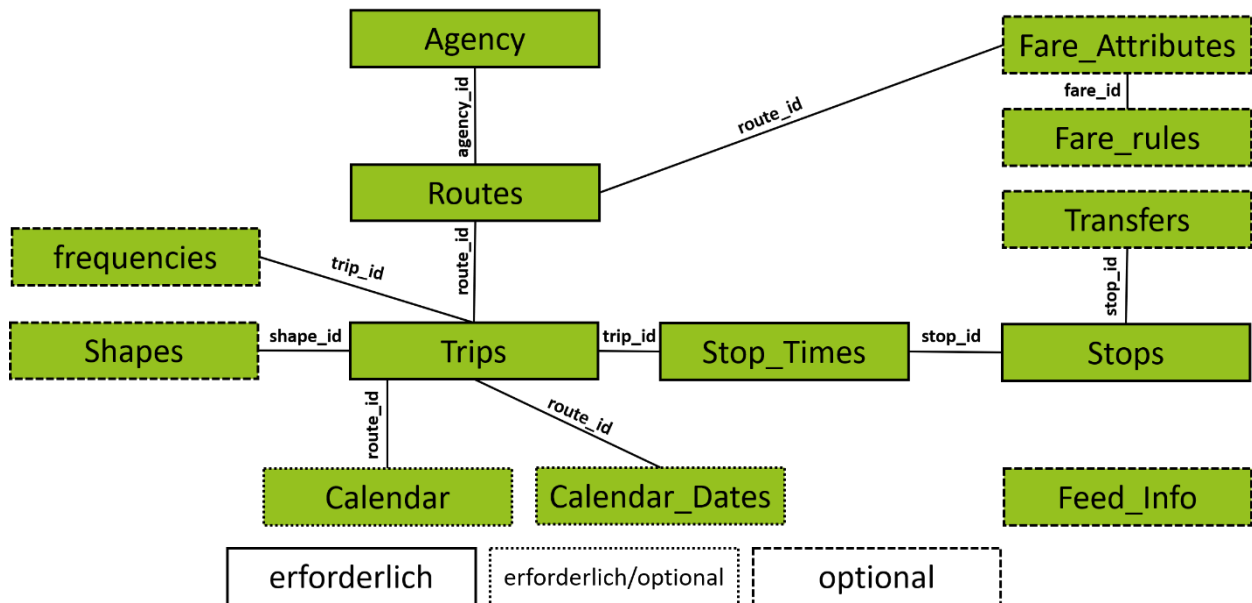


Abbildung 4 Darstellung des GTFS-Datenmodells in Anlehnung an Gidam et al. (2020; lab- lonovski)

In der Tabelle 1 sind die einzelnen Datensätze eines GTFS-Feeds näher beschrieben. Es werden nur die Dateien eines GTFS-Feeds vorgestellt, die zur Beschreibung des Systems notwendig sind und werden mittels der GTFS-Schedule Specification beschrieben, welche eine Adaption der offiziellen Spezifikation ist. In dieser Formalisierung eines GTFS-Feeds werden unter anderem die einzelnen Datentypen der Attribute festgelegt. Daneben werden Ziele formuliert, an denen sich die Verkehrsbetreiber halten sollen. Zum einen wird angestrebt, dass ein GTFS-Feed mindestens für sieben Tage nach Veröffentlichung des Feeds valide sein soll; bestenfalls für den genannten Zeitraum in den Daten. Darüber hinaus wird angeregt, dass GTFS -Daten gepflegt werden sollen. (GTFS Transit Feed Specification 2022)

Tabelle 1 Daten eines beispielhaften GTFS-Feeds (GTFS Transit Feed Specification 2022)

Datensatz	Beschreibung der Tabelle
Agency	Enthält Informationen zu den Verkehrsunternehmen, deren Linien im GTFS-Feed enthalten sind.
Routes	In dieser Tabelle werden alle Informationen zu den enthaltenen Linien hinterlegt. Z. B. Bezeichnung und Nummer der Linie, aber auch, ob es sich um einen Bus, Straßenbahn oder Zuglinie handelt.
Trips	In der Trips-Tabelle sind alle Fahrten einer einzelnen Linie aufgelistet. Unter Trips wird in der GTFS-Logik eine Fahrt verstanden, die mindestens zwei Stopps hat.
Stops	Haltestellentabelle mit Koordinaten, an denen die Fahrzeuge halten.
Stop_Times	In dieser Tabelle sind alle Informationen zu den An- kunfts- und Abfahrtszeiten an den jeweiligen Haltestellen für jede Fahrt hinterlegt.
Calendar	Dort sind die Verkehrstage der Linien gespeichert. Diese Tabelle wird benötigt, wenn nicht sämtliche Tage in Calendar_Dates definiert sind.

Calendar_Dates

Dort sind die Ausnahmen vom regelmäßigen Fahrplan abgelegt. Falls Calendar nicht existiert, muss in dieser Datei der Fahrplan für alle Tage des Fahrplansolldatenzeitrahmens hinterlegt sein.

4.1.2 Aufbereitung der GTFS-Daten

Um einen konsistenten Datensatz zur Analyse der Reisezeiten zu haben, werden die beiden zu verwendenden GTFS-Datensätze für einen Werktag aufbereitet. Zur Validierung der Feeds gibt es eine Fülle an OpenSource-basierten Tools, die nachfolgend aufgelistet werden.

- **gtfstidy:** Dieses Tool bereinigt auftretende Inkonsistenzen innerhalb eines GTFS-Feeds, minimiert die Größe eines Feeds und erzeugt semantisch gleiche Datensätze. (Brosi 2022)
- **GTFSK:** Ist ein in Python programmiertes Tool zur Validierung und Analyse von GTFS-Feeds. Dieses Tool ist mit einer Fülle an Funktionen ausgestattet, um beispielsweise Feeds räumlich zu verschneiden.
- **gtfstools:** Eine für die Programmiersprache R entwickelte Paket zur Bearbeitung, Analyse, zum Schreiben und Vereinen mehrerer GTFS-Feeds. Dieses Tool ist neben der Aufbereitung der Feeds hilfreich, um Kennwerte berechnen zu können wie Fahrzeiten von Fahrten oder Beförderungsgeschwindigkeit zu bestimmen.
- **gtfs-validator:** Der *gtfs-validator* ist ein *Commandline-Tool* zur Validierung eines Feeds. Dieses Tool ist insbesondere für ÖPNV-Betreiber entwickelt, welche Feeds veröffentlichen. Das Tool überprüft, ob die Datenintegrität zur Bereitstellung eines Feeds vorliegt. Eine inhaltliche und verkehrsplanerische Validierung findet nicht statt.
- **GTFSVTOR:** Der GTFSVTOR bietet umfangreiche Validierungsschritte, welche primär für GTFS-Betreiber Validierungen anbieten. Über <https://gtfs.mfdz.de/> werden Validierungsergebnisse des Tools bereitgestellt. Für den Feed zur Abbildung des ÖV in Niedersachsen werden rund 14.300 Fehler angezeigt. Für den GTFS-Feed des MDV existieren keine Fehler, sondern nur Warnungen

Die in der Aufzählung dargestellten Tools setzen den Planer u. a. in die Lage, umfangreiche Analysen in kurzer Zeit für GTFS-Feeds zu erzielen. Um aber einen in sich konsistenten Fahrplan zu erstellen, müssen die in dem Feed enthaltenen Linien mit anderen Daten abgeglichen werden. In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Validierung des Feeds stichprobenhaft über den Abgleich mit anderen Fahrplanquellen. Der manuelle Abgleich ist an dieser Stelle erforderlich. Es liegen öffentlich zugängliche Programmierschnittstellen vor, die genutzt werden könnten, um automatisiert Abfahrtsinformationen zu den Haltestellen bzw. zu den Linien der Untersuchungsgebiete abzufragen. Ihre Legalität ist aber zweifelhaft, weshalb auf ihren Einsatz verzichtet.

Die Herausforderung bei der Validierung der Daten liegt weiterhin darin begründet, dass die GTFS-Daten Niedersachsens entgegen der Zielformulierungen in GTFS Transit Feed Specification (2022) nicht konsequent umgesetzt werden. Das heißt, dass beide Tabellen -- *calendar* und *calendar dates* - Anwendung in dem Feed finden und somit eine einheitliche Vorgehensweise nur eingeschränkt möglich ist³.

³ Als Vorgriff zum Aufbau des Reisezeitmodells sei bereits hier erwähnt, dass das es für den OTP keine Rolle spielt. Er baut aus den zur Verfügung stehenden Daten einen plausibles ÖV-Graphen.

Es existieren bereits Tools, die auch verkehrsplanerische Größen zur Validierung eines GTFS-Feeds anwenden. Sie setzen oft die Reisezeit, welche sich über die *arrival times* eines *trips* einer *routes* ins Verhältnis zur Länge des *trips*. Die beiden zu verwendenden Datensätze verfügen entweder gar nicht über *shapes*⁴-Tabellen, sodass die Abschätzung über Kenngrößen zur Beförderungsleistung u. a. nicht angewendet werden können.

4.2 Aufbau des Modells

Zur Ermittlung und Berechnung der verbindungsbezogenen Angebotsqualitäten des ÖPNV wird ein Reisezeitmodell benötigt, welches neben der Analyse der Reisezeiten weitere relevante Parameter ermittelt. Das Modell muss zudem in der Lage sein, große Verflechtungen umzulegen und zugleich größtmögliche Stabilität gewährleisten. Eine einfache Implementierung wird als eine weitere Anforderung definiert. In der wissenschaftlichen Anwendung zur Berechnung größerer uell-Zielbeziehungen des ÖV gibt es eine Vielzahl an Optionen. Ein für die Programmiersprache R implementierte Routing Engine *gtfsrouter* erzielt gute Rechenergebnisse bei der Berechnung einer großen Anzahl an Verbindungen. Lediglich die Anzahl der Parameter ist gering. (Padgham 2021)

In der vorliegenden Arbeit wird als Reisezeitmodell der OTP verwendet, der nachfolgend vorgestellt wird.

4.2.1 OpenTripPlanner

Der OTP ist ein open source-basiertes Tool, um multimodale Verkehre umlegen zu können. Dabei liegt der inhaltliche Schwerpunkt des OTP auf der GTFS-basierten Berechnung von Verbindungen des ÖPNV. Der OTP ist ein multimodaler Router, der auf allen gängigen Plattformen läuft. Der in Java geschriebene Router greift zur Abbildung des Straßennetzes auf OSM zurück und verwendet GTFS-Daten zur Berechnung der Parameter des ÖV. (Young 2019)⁵

Der OTP liegt derzeit in zwei Versionen vor. Die aktuellste Version ist der OTPv2, der über eine höhere Performance verfügt und eine größere Vielfalt an alternativen Verbindungen beim Umlegen zurückgibt. Im Gegensatz zur älteren Version verfügt der OTPv2 nicht über die Funktion zur schnellen Berechnung von vektorbasierten Isochronen. (Young 2019) Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit auf den OTPv1.5 zurückgegriffen werden. Die Isochronenfunktion ist ein hilfreiches Tool zur Validierung und Berechnung überschlägiger Erreichbarkeitsindices.

Technisch besteht der OTP aus drei Komponenten, auf die nachfolgend eingegangen wird.⁶ Die drei Softwarekomponenten des OTP sind der *Graph-Builder*, die *Routing-Engine*, sowie die graphische Oberfläche. Der *Graph-Builder* erzeugt auf Grundlage der OSM- und GTFS-Daten ein routingfähiges Netz. Über Haltestelleninformationen, die in beiden Datenquellen enthalten sind, werden die GTFS- und OSM-Daten verknüpft.

In der Erreichbarkeitsforschung werden zwei klassische Ansätze unterschieden. Neben der vektorbasierten Berechnung von Isochronen können Widerstände auf Relationen ausgewiesen werden. (vgl. Hesse et al. (2012)) Der OTP hat neben der Funktion, Reisezeiten bzw. Widerstände

⁴ In der *shapes*-Tabelle werden die Geometrien eines *trips* hinterlegt.

⁵ Der Aufbau einer eigenen Instanz wird ausführlich in Young 2019 beschrieben

⁶ Über eine umfangreichere Erläuterung zu den technischen Grundlagen des OTP wird auf Kuntzsch 2015 verwiesen.

zwischen Quellen und Zielen zu berechnen auch eine Schnittstelle zur Berechnung vektorbasierter Isochronen. Diese Differenzierung hat erhebliche Vorteile und ist deshalb auch ein geeignetes Tool, um Angebots- und Verbindungsqualitäten des ÖPNV zu berechnen.⁷

Nach dem eine OTP-Instanz initiiert ist, können über die API-Schnittstelle Abfragen an den OTP gestellt werden. Die Ergebnisse werden serverseitig in der Form einer JSON-Datei bereitgestellt, die dann in einer Skriptsprache wie z. B. Python gelesen werden kann. Um die Effizienz der Abfragen zu erhöhen, wird ein Grundskript entwickelt, welches neben dem *Threading* auch eine Verbindung zu einer PostgreSQL-Datenbank bereithält, in der die Daten nach Abfrage gespeichert werden. So wird eine Datenkonsistenz hinsichtlich der Aufbereitung gewährt.

Um die Kenngrößen zur Berechnung der Angebots- und Verbindungsqualität relationsscharf generieren zu können, werden aus den bereitgestellten JSON-Dateien die Informationen extrahiert.

4.3 Modellparameter

In der Verkehrsplanung werden unterschiedliche Parameter zur Modellierung der Verkehre herangezogen. Diese unterscheiden sich je nach Fragestellung. So werden in den RIN 2008 modellgestützte Werte zur Abbildung der Zugangs-, Abgangs- und Startwartezeit bereitgestellt, um eine ganze Fahrtenkette modellieren zu können. Unter der Fahrtenkette werden dabei alle Teilaspekte einer Reise verstanden. Den RIN 2008 folgend wird die Reisezeit demnach, wie in Abbildung 5 dargestellt, beschrieben.

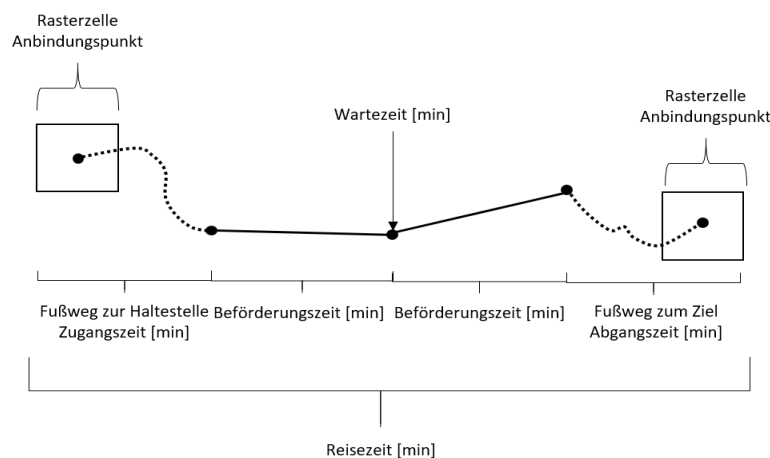


Abbildung 5 Graphische Darstellung der Reisezeit

Da die Reisezeit aus einer Vielzahl aus Teilaspekten besteht, müssen nachfolgend diese Parameter definiert werden. Eine Abbildung der Startwartezeit (SWZ) erfolgt nicht. Zur Modellierung der SWZ und einer Diskussion wird auf Peter (2021) verwiesen. Da die Arbeit aber auf Rasterzellebene Reisezeiten zwischen einer Vielzahl an Relationen berechnet, ist die Korrektur um die nachrangig, da die modellierten SWZ auch zufällig wirken. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2009)

⁷ Es liegen ansonsten andere Tools vor, die auch aus GTFS Kenngrößen berechnen können. Der Vorteil des OTP ist es aber, dass Berechnungen relationsscharf Kenngrößen liefern. Ein vergleichbares Tool wie der *gtfsrouter* rechnet noch effizienter Reisezeiten, weist aber nicht Kenngrößen wie Wartezeiten z. B. aus.

Unter Modellparameter werden also im Folgenden die Werte gefasst, die die Berechnung der Reisezeiten ermöglichen. Darunter fallen beispielsweise Größen, die etwa die Fußgängergeschwindigkeit abbilden. Neben der nun unter Modellparameter subsumierten Größen kann der OTP auch über drei *Config-JSON* angepasst werden. Darunter fallen Konfigurationen, wie lange etwa die Zugangszeiten zu U-Bahnhöfen sein sollen. Da das vorliegende Umlegungsmodell die vorgegebene Konfiguration wählt, wird auf die Dokumentation zu der Konfigurationsmöglichkeit verwiesen. (OpenTripPlanner 2020)

In der nachfolgenden Liste sind die wesentlichen Modellparameter und ihre verwendeten Werte dargestellt:

- **walkSpeed (Gehgeschwindigkeit m/s):** 1,3 m/s
- **Optimize (Routenwahloptimierung):** Der OTP optimiert die Routen hinsichtlich der Geschwindigkeit, es werden also die schnellsten Routen zurückgegeben.
- **arriveBy (Start der Reisezeit boolean):** Wird auf *false* gesetzt, um sicherzustellen, dass die Reise zum Zeitpunkt des Beginns starten soll.
- **maxWalkDistance (maximale Gehdistanz):** Je Fahrtenkette werden maximal 2.000 m Fußweg als obere Grenze gewählt.
- **numltineraries (Anzahl zurückgegebener Verbindungen je Relation):** Je Relation werden maximal 20 Verbindungen zurückgegeben.
- **clampInitialWait (Modellierung der SWZ integer):** Die SWZ wird in der vorliegenden Arbeit nicht modelliert; daher wird der Parameter auf 0 gesetzt.

5 Analyse der Angebotsqualität

Zur Beurteilung eines ÖV-Angebots werden Kennzahlen benötigt, welche umfassend und allgemein Kriterien formulieren und diese quantitativ bewerten. Als beschreibende Parameter können

- die Anzahl und Lage der Haltestellen,
- die Anzahl der Linien,
- die Fahrzeiten zwischen Linien,
- sowie die Fahrzeugfolgezeiten

aufgefasst werden. (Hartl 2020)

Diese Kenngrößen beschreiben quantitativ das ÖV-Angebot und sind ableitbar aus den GTFS-Daten und können herangezogen werden, um ÖV-Systeme zu vergleichen. Durch den Aufbau des OTP sind aber umfangreichere Qualitätskriterien ermittelbar, um einen Systemvergleich durchzuführen. Daher werden im Folgenden sowohl Kriterien untersucht, die unmittelbar aus GTFS ableitbar sind als auch Kriterien, die durch ein Umlegungsmodell berechnet werden können.⁸

Die Angebotsqualität des ÖV ist ein Maßstab, welcher sich aus verschiedenen Ansätzen und Komponenten zusammensetzt. Eine Beschreibung kann sowohl quantitativ als auch qualitativ erfolgen. Die Beschreibung der Ausstattung einer Haltestelle ist eine qualitative Größe. Daher ist es wichtig, dass die Perspektive und die Fragestellung bei der Analyse der Angebotsqualität klar festgelegt werden. Die vorliegende Arbeit untersucht die Kriterien, die aus GTFS-Daten berechenbar sind. Im Allgemeinen ist eine analytische Beschreibung des Angebots aus vielerlei Sicht sinnvoll. Aktuell werden rund 60 % der Wege mit dem mIV zurückgelegt. Dies ist sowohl durch Präferenzen und strukturellen Voraussetzungen bedingt, aber sehr wohl auch durch die Ausgestaltung des ÖV-Angebots. Legt man nämlich die Angebotsqualität des ÖV in der Stadt zugrunde, so zeigt sich eine schnelle und kostengünstige Alternative. Ist der Untersuchungsgegenstand hingegen im ländlichen Raum verortet, ergibt sich eine andere Gewichtung. (Pütz und Schönfelder 2018) Inwieweit die heute in Richtlinien ausgewiesenen Werte zur Beschreibung der Angebotsqualität überhaupt für den ländlichen Raum anwendbar sind, wird im Folgenden analysiert und diskutiert.

5.1 Erschließungsqualität

Der VDV unterscheidet unterschiedliche Nutzungsdichten von Räumen, um Ziele zur Angebotsqualität des ÖPNV zu formulieren. In der richtlinienbasierten Verkehrsplanung ist es ein bewährtes Verfahren zur Beschreibung und Bewertung eines Systems, Zielvorgaben in Abhängigkeit räumlicher Strukturmerkmale festzulegen. Verkehrssysteme ermöglichen die Erschließung des Raumes. Die Herausforderung besteht aus planerischer Sicht darin, quantifizierende Größen zur Beschreibung der Erschließung bereitzustellen. Unter Erschließung sei im vorliegenden Kontext ein Maßnahmenbündel zu verstehen, welches die Anbindung an das ÖV-System einer Region gewährt. Unter Erschließungsqualität ist dann nach Hanitzsch (2015) ein Parameter zu

⁸ Es sei hier erneut betont, dass auch Tools nachfolgend angewandt werden, die Reisezeiten ohne einen Verkehrsgraphen im klassischen Sinne berechnen können.

verstehen, welcher den Anteil der Siedlungsfläche ausweist, die gut durch den ÖPNV erschlossen ist. In der heutigen Planungspraxis wird der Erschließungsgrad über sogenannte Haltestelleneinzugsbereiche in Abhängigkeit der Nutzungsdichte und des Verkehrsangebots ermittelt, wie das Beispiel des VDV zeigt. (Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) 2019) Die Luftliniendistanzen können dann über Umwegfaktoren in Fußwegzeiten umgerechnet werden. Mit dem OTP liegt ein Tool vor, welches auch Fußverkehrsrouting ermöglicht. \\\

Das nachfolgende Verfahren greift methodisch das Konzept des Haltestelleneinzugsbereichs auf und bildet für jede bewohnte Gitterzelle mit 100 m Kantenlänge einen Buffer von 1.500 m um den Zentroiden (geometrische Schwerpunkt) einer Zelle. Die Haltestellen innerhalb des Buffers werden der Zelle zugeordnet und mittels einer Umlegung werden die fußläufigen Gehweiten zwischen dem Zentroiden einer Zelle und den Haltestellen berechnet.

In Abbildung 6 sind die räumlichen Verteilungen der durchschnittlichen Gehweiten zur nächsten Haltestelle auf einem 300m Gitter aggregiert. Die Betrachtung des Durchschnitts zeigt, dass eine überwiegend gute Erschließung in den beiden Untersuchungsräumen vorliegt.

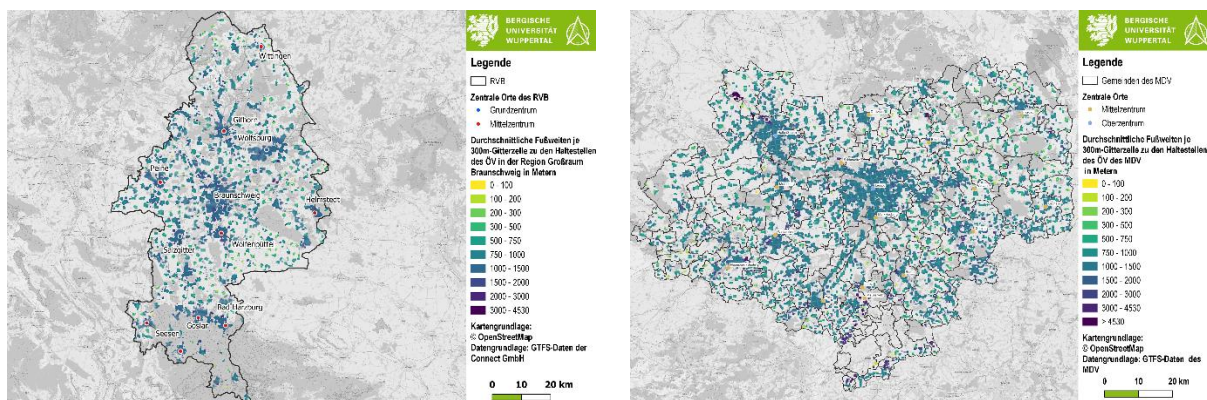


Abbildung 6 Durchschnittliche Fußweiten je 300 Gitterzelle zu den Haltestellen des ÖV im RVB und im MDV

Erweitert man den Ansatz der Erschließung um den Faktor der Bedienhäufigkeit - es soll also eine Gewichtung der Haltestelleneinzugsbereiche vorgenommen werden - so kann auf den *gtrfsrouter* zurückgegriffen werden. Neben der Betrachtung der minimalen fußläufigen Entfernungen werden in einem nächsten Schritt die Entfernungen mit den erreichbaren Haltestellen von jeder Haltestelle in der Hauptverkehrszeit (HVZ) gewichtet, um die Bedienungsqualität zu berücksichtigen. Für diese Analyse kann auf *gtrfsrouter* zurückgegriffen werden, welcher minimale Reisezeiten zwischen allen Haltestellen berechnet und die Haltestellen erfasst, welche innerhalb des vorgegebenen Intervalls erreicht werden. Das für R entwickelte Tool verfügt über sehr effiziente Routingalgorithmen, welche im Vergleich zum OTP schnellere Ergebnisse liefert. Der Informationsgrad, der aus den GTFIS-Daten extrahiert und abgeleitet werden kann, ist jedoch nicht so umfangreich. Um jedoch die Frage der Erschließungsqualität nicht nur aus der Sicht der Anbindung an den ÖPNV zu betrachten, sondern auch eine qualifizierte Bewertung der Bedienungsqualität der Haltestellenanbindung vorzunehmen, ist der sogenannte *gtrfsrouter* geeignet.

Nach Anwendung des in R geschriebenen Skriptes liegen für alle Haltestellen in den Untersuchungsgebieten neben der Reisezeit zu allen anderen Haltestellen auch die Information vor, wie viele Umsteige je Haltestelle benötigt werden. Für die vorliegende Analyse werden nur die Haltestellen berücksichtigt, die innerhalb einer Stunde in der morgendlichen HVZ zwischen 6 und 8

Uhr morgens an einem Werktag erreichbar sind. Für jede bewohnte Gitterzelle mit 100 Kantenlänge wird die fußläufig nächste Haltestelle gewählt, die stellvertretend in die Bewertung der Bedienungshäufigkeit berücksichtigt wird.

Für die Analyse der erreichbaren Haltestellen, die in Anlehnung an Fayyaz et al. (2017) ermittelt werden, wird die Summenhäufigkeitsverteilung herangezogen, um die Regionen untereinander zu vergleichen. Die Gegenüberstellung der Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 7 zeigt, dass die Haltestellen sich hinsichtlich der Erschließung unterscheiden. So sind die Verteilungen für die Gemeinden ohne zentralörtliche Funktion für beide Regionen sehr ähnlich. Zieht man hingegen die Grund- und Oberzentren mit in die Analyse ein, so unterscheiden sich beide Regionen. Es werden also Unterschiede in der Erschließungsqualität sichtbar, die bei dem einfachen Vergleich der fußläufigen Entfernungen nicht deutlich werden.

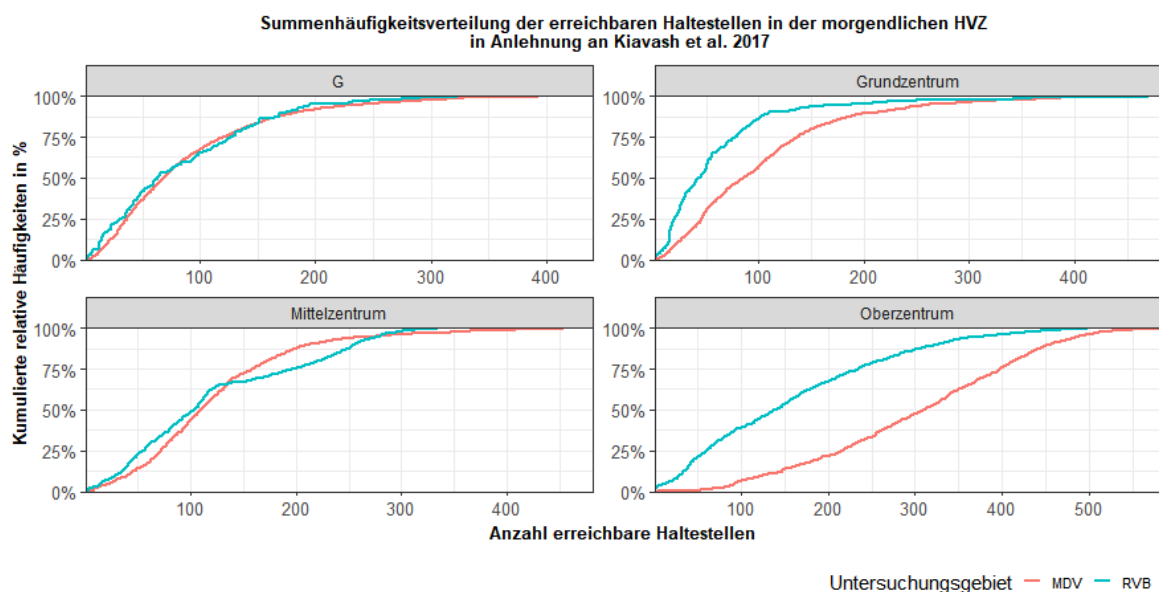


Abbildung 7 Summenhäufigkeitsverteilung der erreichbaren Haltestellen in der morgendlichen HVZ in Anlehnung Fayyaz et al. (2017)

Die Analyse der Erschließungsqualität erzielt durch den Einsatz von GTFS-Daten und mit der Unterstützung eines Routers neue Möglichkeiten. Für beide Regionen kann gezeigt werden, dass sie über eine gute Erschließung verfügen. Bezieht man als ein weiteres Kriterium die Erschließung der Haltestellen über die Anzahl erreichbarer Haltestellen ein, zeigen sich regionale Unterschiede. Ein Einfluss könnte die Gestaltung der Netze bedeuten.

5.2 Bedienungsqualität

Die Bedienungsqualität als Kriterium beschreibt das zeitlich gestaffelte Beförderungsangebot eines ÖV-Systems in einer Stadt oder Region. (Pütz und Schönfelder 2018) Kirchhoff und Tsakarestos (2007) argumentieren, dass im ländlichen Raum die Bedienungshäufigkeit das Ergebnis politischer Entscheidung sei, inwiefern die Ziele der Daseinsvorsorge berücksichtigt werden sollen. Sie ist daher viel weniger ein Ergebnis der Nachfrage als der Angebotsorientierung. Der VDV weist in Abhängigkeit der Nutzungsdichten Fahrzeugfolgezeiten aus, die auch über die Anzahl der Abfahrten in einer Raumeinheit (Polygon, Rasterzelle) beschrieben werden kann. (Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) 2019)

Eine Annäherung an den Begriff der Bedienungsqualität bieten die sogenannten Tagesganglinien. Unter der Tagesganglinie will die Anzahl der Fahrten, unter denen sowohl An- als auch Abfahrten subsumiert werden können, je Zeitintervall verstanden werden. Daneben bieten Tagesganglinien eine einfache Vergleichsgröße bzw. Darstellungsform, um Regionen respektive ÖV-Systeme zu beschreiben. In Abbildung 8 ist das werktägliche Fahrtenangebot des ÖV in beiden Untersuchungsregionen dargestellt. Die tageszeitliche Verteilung ist für beide Regionen ähnlich. Auch die in der Verkehrsplanung bekannten Haupt- und Nebenverkehrszeiten sind der Darstellung zu entnehmen. Für den RVB sind zudem die Schulverkehre zu erkennen, die ihre tageszeitlichen Schwerpunkte morgens zwischen 7 und 8 Uhr und zwischen 13 bis 14 Uhr haben.

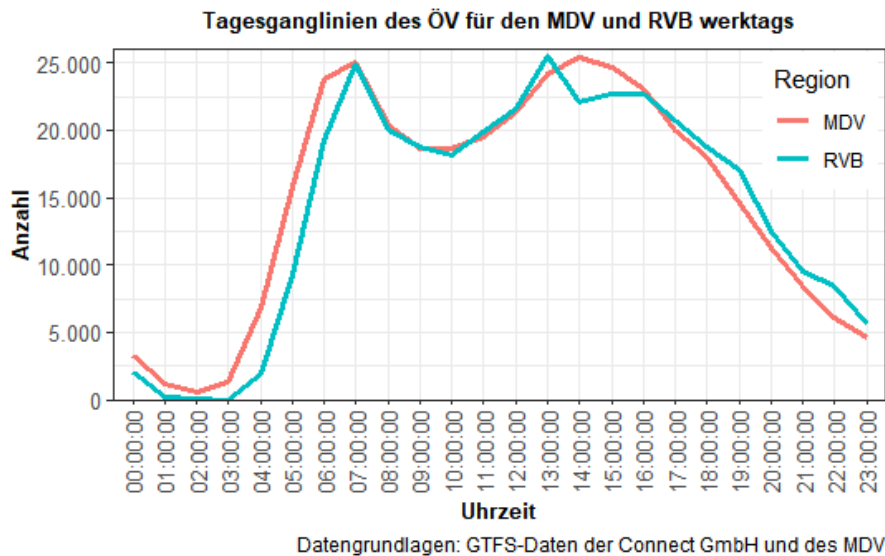


Abbildung 8 Tagesganglinien des ÖV für den MDV und den RVB werktags

Die Bedienungshäufigkeit kann auch räumlich dargestellt werden. Dazu werden die Abfahrten je Haltestelle für die morgendliche HVZ identifiziert. Da die Haltestellen im Datenmodell georeferenziert vorliegen, können für alle Rasterzellen die Haltestellen räumlich zugeordnet werden und die Summe über alle Abfahrten der Haltestellen je Gitter kann gebildet werden.

In Abbildung 9 sind die räumlichen Verteilungen der Abfahrten in der morgendlichen HVZ dargestellt. In beiden Regionen sind die Abfahrtpotentiale insbesondere in den Oberzentren als hoch einzustufen.

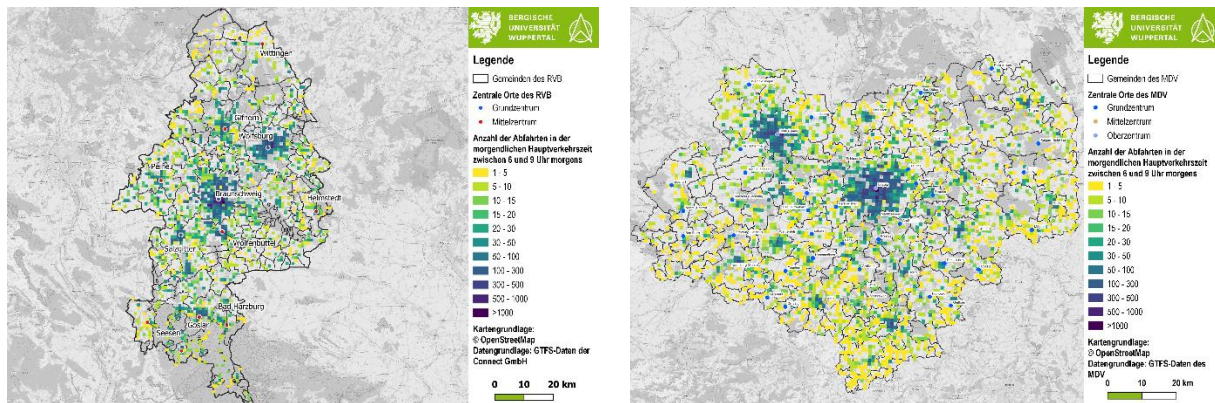


Abbildung 9 Anzahl der Abfahrten je 1km-Gitterzelle in der morgendlichen Hauptverkehrszeit an einem Werktag im RVB und MDV

Dies zeigt auch die Gegenüberstellung der Summenverteilungen der Abfahrten je 1 km Geogrid in der morgendlichen HVZ einzustufen. Die Perzentile der Verteilungen unterscheiden sich nur wesentlich für die Oberzentren beider Regionen. Dieses Ergebnis ist vor allem durch die Großstadt Leipzig geprägt, die wesentlich urbaner ist als die anderen OZ in beiden Untersuchungsgebieten.

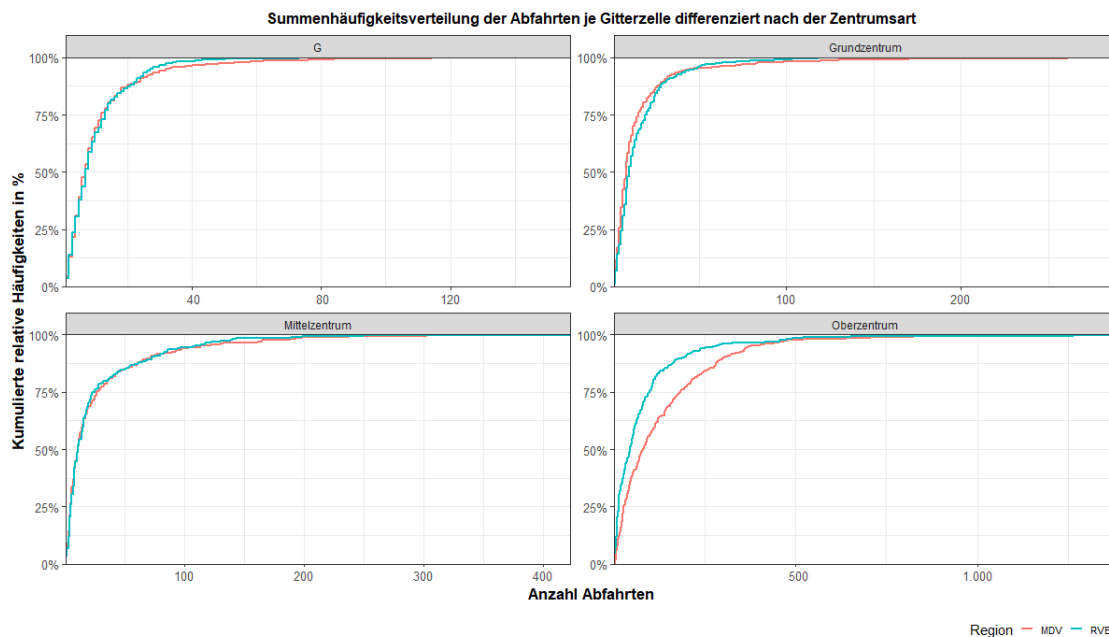


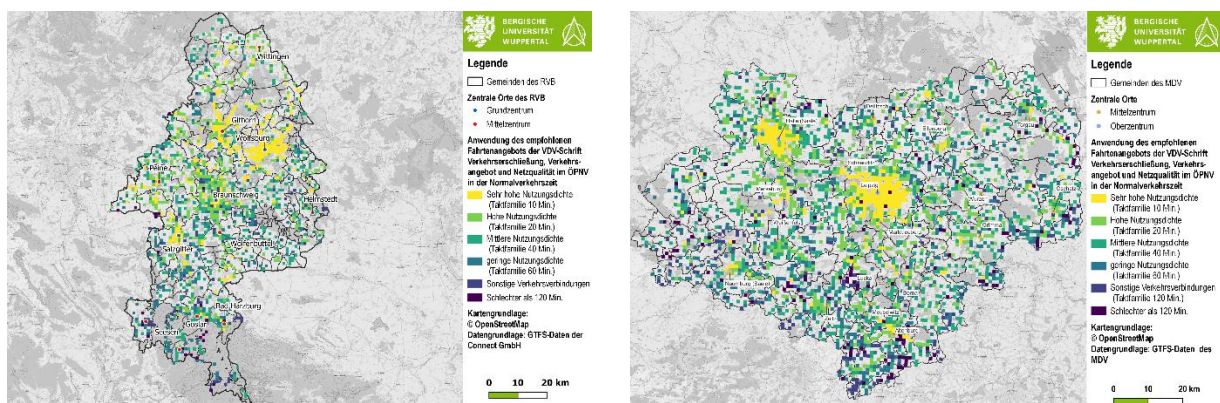
Abbildung 10 Summenhäufigkeitsverteilung der Abfahrten je Gitterzelle mit 1 km Kantenlänge differenziert nach der Zentrumsart

Die Darstellung der Bedienungshäufigkeit beider Regionen lässt den Rückschluss zu, dass ein ähnliches Fahrtenangebot in der Ausgestaltung des ÖV vorliegt. Dieser Zusammenhang ist für die vorliegende Arbeit eine wichtige Erkenntnis, da die Netze nicht nur aus einer angebotsbezogenen Sicht analysiert werden, sondern zugleich verbindungsbezogen. Die Sichtbarmachung der Unterschiede kann dann nach beiden Analyseschritten auf die verbindungsbezogene Qualität zurückgeführt werden.

Das Vorgehen zeigt, dass eine kleinräumige Analyse und eine Differenzierung der Raumtypen für die Beurteilung der Bedienungsqualität aufschlussreich sind, um zwei Regionen zu vergleichen, da der alleinige Vergleich zwischen den absoluten Tagesganglinien ist nicht zielführend. Der VDV definiert ein empfohlenes Fahrtenangebot differenziert nach der Schwachverkehrszeit (SVZ) und der Nebenverkehrszeit (NVZ). Aus den Berechnungen der Bedienungsqualität kann ein Fahrtenangebot abgeleitet werden. Unter Fahrtenangebot wird sodann ein Takt verstanden. Der VDV unterscheidet dabei zwischen Gebieten mit sehr hoher Nutzungsdichte, hoher Nutzungsdichte, mittlerer Nutzungsdichte und geringer Nutzungsdichte. Für die hier verwendeten Raumtypen der ZO lässt sich aus der Ermittlung des Fahrtenangebots empirisch überprüfen, welche Nutzungsdichten für die Gitterzellen vorliegen. Vereinfachend wird die ermittelte Bedienungsfähigkeit durch die Intervallslängen der Verkehrszeiten geteilt. Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2019) empfiehlt, jedoch die zusätzliche Berücksichtigung der S-Bahnen aufzugreifen, sofern sie zur städtischen Erschließung beitragen.

Da für den GTFS-Feed des MDV keine Geometrien der tatsächlichen Routenverläufe vorliegen und die Zuordnung der Linien zu denen in OSM nicht trivial ist (vgl. hierzu Bast und Brosi (2018)), werden die Taktfamilien über die Haltestellen identifiziert. Dies hat den Vorteil, dass die in Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2019) ausgewiesenen Nutzungsdichten kleinräumig auf das 1 km-Kantenlänge Gitter aggregiert werden können. Die Fahrtenfolgezeiten werden demnach für jede Haltestelle ermittelt. Im Anschluss wird der Median über alle Haltestellen je Gitter bestimmt.

Die Ableitung des empfohlenen Fahrtenangebots in Abbildung 11 ist kein geeigneter Ansatz, um Nutzungsdichten abzuleiten. Die Wahl des Medians der Anzahl der Abfahrten der Haltestellen innerhalb eines Gitters mit 1 km Kantenlänge erzielt keine plausiblen Ergebnisse. So wird nach Anwendung des Verfahrens eine höhere Nutzungsdichte in Wolfsburg (RVB) bestimmt als in Braunschweig (RVB).



5.3 Anwendung des CUM-Index

Als eine einfache Möglichkeit den CUM-Index zu berechnen, ohne eine inhaltliche Bewertung der Ziele vorzunehmen, kann für jede bewohnte Gitterzelle mit 100 m Kantenlänge eine vektorbasierte Isochrone berechnet werden, welche die maximal mögliche erreichbare Fläche in der HVZ

repräsentiert. Dieses Vorgehen hat zum einen den Vorteil, dass es leicht umgesetzt werden kann und bietet zudem die Möglichkeit, komplexere Analysen durchzuführen. Die erzeugten vektorbasierten Isochronen können z. B. mit POI verschnitten oder mit anderen Faktoren gewichtet werden, wodurch ein Erschließungspotential abgeleitet wird.⁹

In den Abbildung 12 sind die räumlichen Verteilungen der erreichbaren Flächen je Gitterzelle mit 100 m Kantenlänge für beide Regionen dargestellt. Beiden Regionen ist gemein, dass insbesondere die Gitterzellen in den OZ über eine sehr gute Erreichbarkeit in der Fläche verfügen.

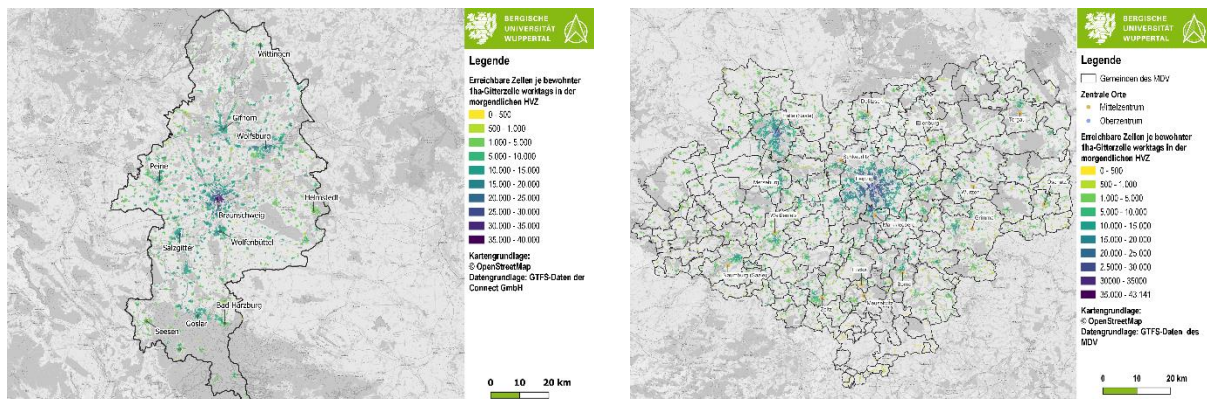


Abbildung 12 Erreichbare Zellen je bewohnter 1ha-Gitterzelle des RVB und MDV

Schaut man sich die Verteilung der Daten differenziert nach der Zentrumsart an, so fällt auf, dass die Zentren im RVB über eine bessere Flächenerschließung verfügen als die Gitterzellen mit 100 m Kantenlänge im MDV. Diesen Schluss lässt auch die Betrachtung der Einwohnerverteilung in Abbildung 14 zu. Auch dort ist die gewichtete Flächenerschließung für den RVB als besser anzusehen. Lediglich für die Zellen, die über eine sehr gute Flächenerschließung verfügen, ist die Verteilung im MDV besser. Dies ist insbesondere auf Leipzig zurückzuführen.

⁹ Die Anzahl erreichbarer Zellen ist eine theoretische Größe. In Anlehnung an Fayyaz et al. 2017, die den Weighted Average Travel Time (WATT)-Index verwenden, um einen leicht interpretierbaren Index zur Beschreibung der Erreichbarkeit einer Haltestelle zu berechnen, kann der hier beschriebene Ansatz eine inhaltlich ähnliche Antwort liefern. Nicht die Anzahl der zu erreichenden Haltestellen je Zelle wird betrachtet, sondern die erreichbare Fläche in einer Stunde. Durch die Verschnidung der vektorbasierten Isochronen lassen sich die Flächen berechnen. Der nach Fayyaz et al. 2017 dargestellte Ansatz wird auch im Kapitel 5.1 zur Erschließungsqualität diskutiert. Im Kern kann der CUM-Index auch als eine Kenngröße der Erschließungsqualität verstanden werden, da das Erschließungspotential quantifiziert wird.

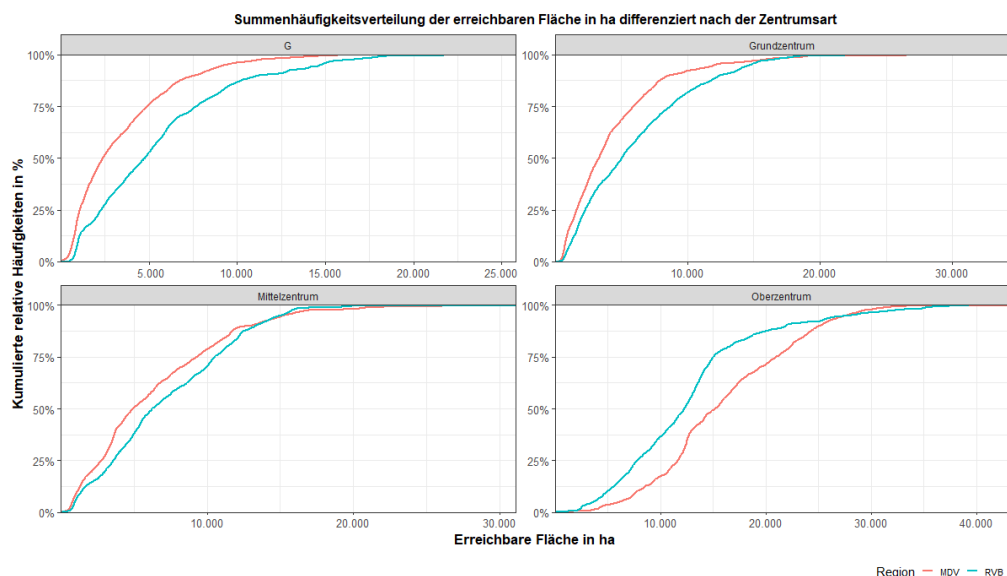
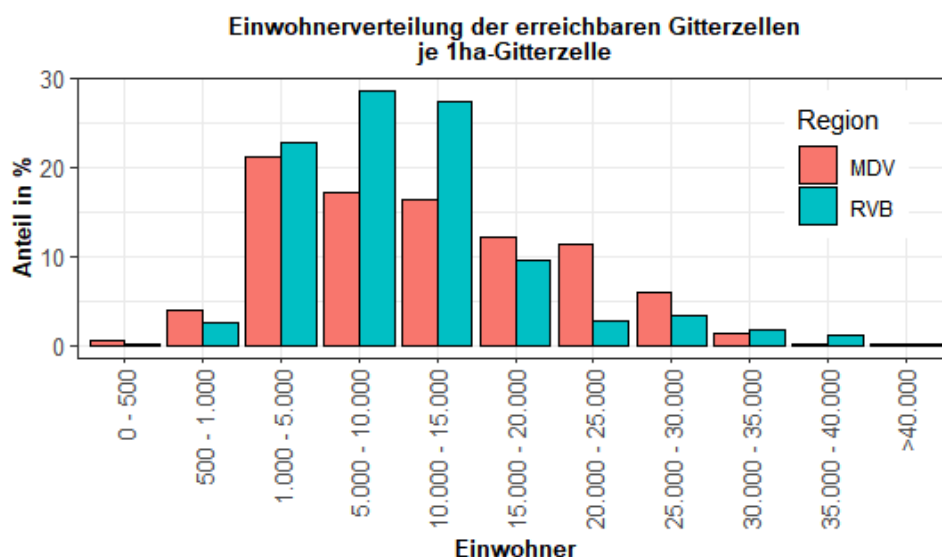


Abbildung 13 Summenhäufigkeitsverteilung der erreichbaren Fläche in ha je Gitterzelle mit 100 Kantenlänge differenziert nach der Zentrumsart



Datengrundlage Einwohner: Zensus 2011/Hochgerechneter Zensus 2011 für RVB

Abbildung 14 Einwohnerverteilung der erreichbaren Gitterzellen je 1 ha-Gitterzelle

Ziehen man nochmal die Analyse der Angebotsqualität über die Anzahl der Abfahrten zugrunde, zeigt die Einbeziehung der Reisezeiten in Form vektorbasierter Isochronen, dass das ÖV-System des RVB auf zentralörtlicher Ebene besser abschneidet. Dies macht deutlich, dass eine reine Analyse der Angebotsqualität, die nicht die Reisezeit mittelbar aufgreift, nicht ausreicht, um eine vergleichende Bewertung vorzunehmen. In den nachfolgenden Kapiteln wird daher die verbindungsbezogene Angebotsqualität der RIN 2008 angewandt, da sie andere Strukturen sichtbar machen kann.

6 Analyse der Verbindungsqualität

Unter der Analyse der Verbindungsqualität wird die verbindungsbezogene Angebotsqualität der RIN 2008 verstanden. Es werden also relationsbezogene Kriterien herangezogen, welche eine quantitative Beschreibung des Netzzustandes erlauben. Die RIN 2008 unterscheiden für den ÖV folgende Kenngrößen je Verbindung:

- Die Luftliniengeschwindigkeit
- Das Reisezeitverhältnis zwischen der Reisezeit des ÖV im Verhältnis zum mIV
- Die Umsteigehäufigkeit

Nachfolgend wird die Methodik nach RIN skizziert, in beiden Vergleichsregionen angewandt und ihre Schwächen diskutiert.

6.1 Analyse der Verbindungsqualität nach RIN 2008

Zur Ermittlung der relationsbezogenen Kenngrößen schlagen die RIN 2008 vor, dass in einem ersten Schritt Umlegungsmatrizen zwischen den ZO mittels Luftlinienverbindungen identifizierten Relationen aufgebaut werden. Im Anschluss werden die dort hinterlegten Relationen auf das tatsächliche Netz umgelegt, um die Kenngrößen zur Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität abzuleiten. Aus der Bewertung der Relationen zwischen den ZO werden klassifizierte Netze hergeleitet, welche beispielsweise die Straßenkategorie aus der definierten Verbindungsfunktionsstufe (VFS) ableiten. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2009) Die RIN 2008 schlagen vor, dass Verbindungen zwischen den Zentren gleicher Zentralitätsstufe sowie die Anbindungen an die nächsthöher gelegenen Zentren untersucht werden sollen. Dabei wird empfohlen, dass in einem ersten Schritt Luftlinienverbindungen zwischen den ersten und zweiten Nachbarn gleicher Zentralitätsstufe gebildet werden soll. Da diese Herangehensweise einen hohen manuellen Aufwand bedeutet, wird ein Verfahren zur automatisierten Identifizierung der Nachbarschaftsbeziehungen entwickelt. Nachfolgend ist das Vorgehen des Verfahrens beschrieben. Die Ausgangslage des Verfahrens besteht in der Betrachtung der Gemeinden gleicher Zentrumsart. Das Verfahren wird beispielhaft an der Identifizierung der Nachbarschaftsbeziehungen für die Grundzentren in der Region Großraum Braunschweig angewandt.

In einem ersten Schritt werden alle angrenzenden Gemeinden eines Zentrums identifiziert. Sofern die angrenzenden Gemeinden eine andere Zentrumsart haben, werden die Geometrien vereinigt. Aus den so erzeugten Gemeinden liegen nach diesem Schritt nur noch Gemeinden mit gleicher Zentralität vor und die Nachbarschaftsbeziehungen ersten Grades können bestimmt werden. Die so bestimmten ZO werden der Liste angehängt, die bereits die Nachbargemeinden gleicher Zentrumsart enthält.

In Abbildung 15 ist die Vereinigung der Grundzentren mit den angrenzenden Gemeinden unterschiedlicher Zentrumsart für die Gemeinde Baddeckenstedt dargestellt. Die schraffierten Polygone stellen die eigentlichen Verwaltungsgrenzen der Grundzentren dar. Durch die Vereinigung Baddeckenstedts mit dem angrenzenden Oberzentrum Salzgitter entsteht eine synthetische Gemeinde. Durch die Vereinigung mit den angrenzenden Gemeinden ergeben sich im Umkehrschluss nur noch Gemeinden gleicher Zentrumsstufe und die Nachbarschaftsbeziehungen können sodann bestimmt werden.

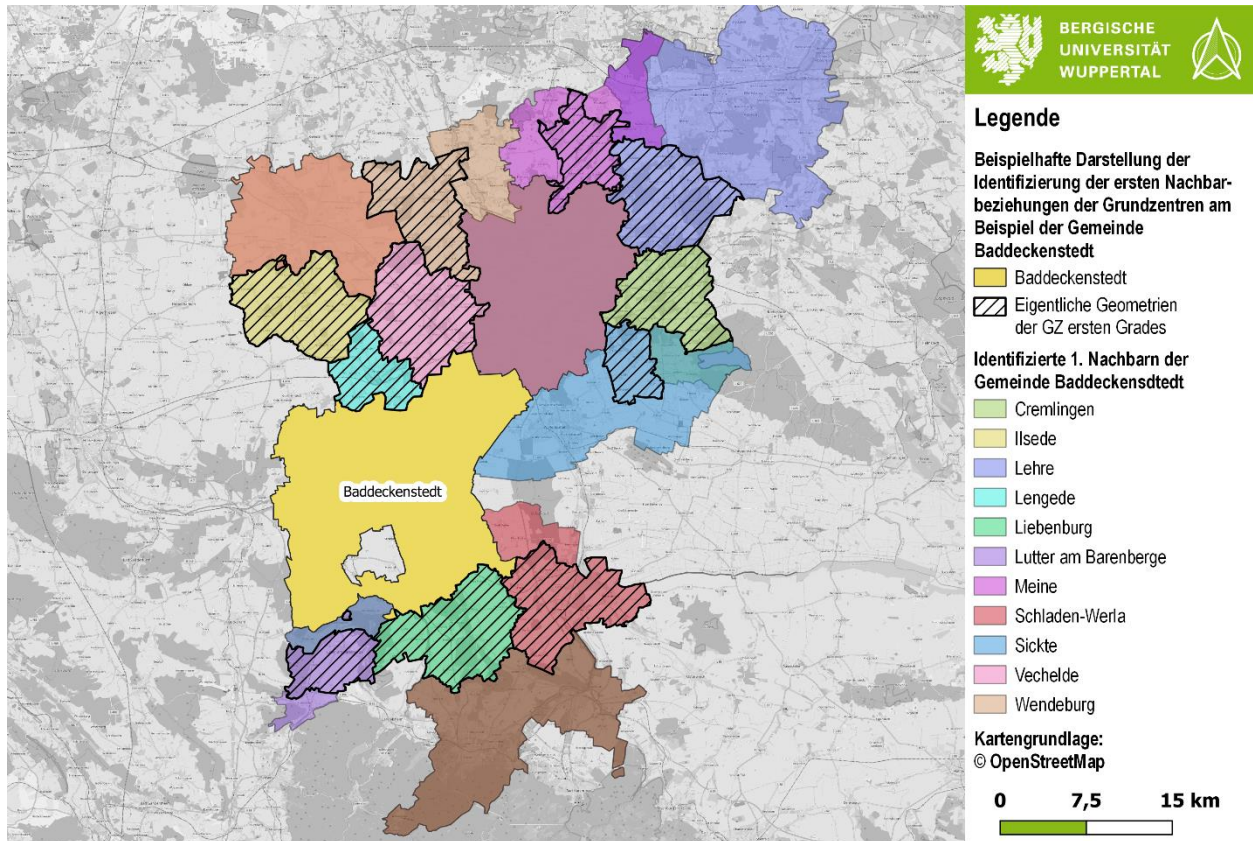


Abbildung 15 Beispielhafte Darstellung der Identifizierung der ersten Nachbarbeziehungen der GZ am Beispiel der Gemeinde Baddeckenstedt

Die zweiten Nachbarn werden vereinfachend über die Luftliniendistanzen identifiziert. Es werden also die im Sinne der RIN 2008-Methodik selbe Anzahl zweiter Nachbarn über die kürzesten Luftliniendistanzen der Zentroiden der Gemeinden definiert.

In Abbildung 16 sind die Nachbarn der Gemeinde Baddeckenstedt dargestellt.

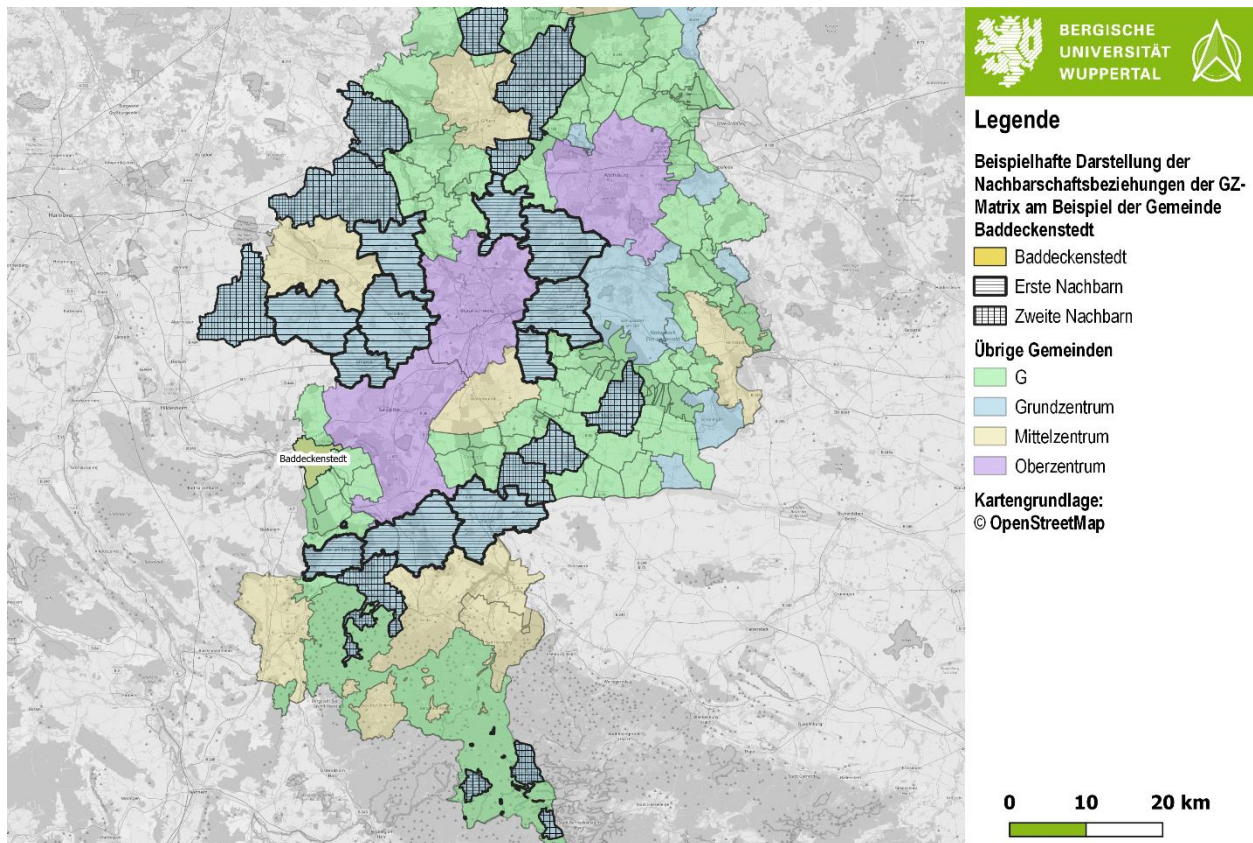


Abbildung 16 Beispielhafte Darstellung der Nachbarschaftsbeziehungen am Beispiel der Gemeinde Baddeckenstedt

Dieses exakte Verfahren birgt die Gefahr, dass für einige Gemeinden sehr viele theoretische erste Nachbarn identifiziert werden, die bei einer manuellen Bestimmung ggf. als zweite Nachbarn ausgewiesen werden. Dies ergibt sich aus der Anwendung eines GIS bei der Ausweisung der Nachbarschaftsgrade. Es werden somit übergenau Nachbarschaftsbeziehungen ausgewiesen. Für diese Fälle macht eine planerische Nachkorrektur im Zweifel Sinn. Die Anbindungen an die Mittelzentren werden analog über den ersten Schritt des Verfahrens bestimmt, da in diesem Fall nur die ersten Nachbarn relevant sind.

Da nun die Nachbarschaftsbeziehungen vorliegen, können die Anbindungspunkte der ZO bestimmt werden. Die Diskussion über die Wahl der Anbindungspunkte für die Analyse der RIN 2008 ist häufig sehr strittig. In den Hinweisen zur Anwendung der RIN werden in Abhängigkeit der Bestimmung mit oder ohne Verkehrsnachfragemodell Verfahrensschritte vorgeschlagen.¹⁰ In der vorliegenden Arbeit werden die Anbindungspunkte nach dem klassischen Verfahren der \

RIN 2008-Methodik gewählt. Da der OTP sowohl ein Fußwegenetz hat als auch Haltestellen, wird ein Mix aus beiden Verfahrensvorschlägen gewählt. Um einen möglichst zentralen Anbindungspunkt einer Gemeinde zu finden, werden in einem ersten Schritt aus OSM die Kirchen identifiziert und mit dem 1km-Geogrid verschnitten. Im nächsten Schritt wird dann aus diesen Zellen die Zelle identifiziert, welche die meisten Abfahrten in der HVZ hat. Im Ergebnis liegen dann für jede

¹⁰ Der OTP ist im klassischen Sinne ein Umlegungsmodell. Es kann also nach den Verfahren mit der Bestimmung mit einem Verkehrsnachfragemodell vorgegangen werden

Gemeinde Anbindungspunkte zur Berechnung der Reisezeiten zwischen den ZO vor. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2018) Es werden für jede Relation mindestens 20 Verbindungen zurückgegeben. Um aus der Fülle an Kandidaten geeignete Verbindungen zu wählen, schlägt die RIN 2008 ein Verfahren vor, welches nachfolgend kurz skizziert wird.

In einem ersten Schritt wird die gewichtete Beförderungszeit t_G für jede Relation ermittelt, welche sich aus der Beförderungszeit t_B und der Umsteigehäufigkeit ergibt. Die Rin 2008 schlagen dazu bei der Auswahl der Parameter eine Differenzierung zwischen städtischen und regionalen Verkehren vor. t_G ergibt sich für regionale Verkehre über $t_{G,Min} = t_B + UH * 10 \text{ min}$. Im Anschluss kann dann die maximal gewichtete Beförderungszeit $t_{G,Max}$ bestimmt werden, welche sich für regionale Verkehre über folgende Gleichung herleiten lässt: $t_{G,Max} = t_{G,Min} * 1.1 + 10 \text{ min}$. Die maximal gewichtete Beförderungszeit ist bedeutsam, um die Anzahl relevanter Verkehrsverbindungen zu identifizieren. Liegen alle Berechnungen vor, so können die mittleren Beförderungszeiten und Umsteigehäufigkeiten je Luftlinienverbindung bestimmt werden. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2009)

Für die 587 Luftlinienverbindungen der VFS-III liegen im Ergebnis nach der Umlegung 5.049 Verbindungen vor, die mittels der beschriebenen Methodik zur Gewichtung einer mittleren Beförderungszeit verwendet werden können, um die Stufen der Angebotsqualität (SAQ) zu berechnen. Die Verteilung der ermittelten Angebotsqualität für die beiden Untersuchungsregionen ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Verteilung der Qualitätsstufen zeigt für den RVB, dass viele Relationen nicht die Kriterien der Rin 2008 erfüllen; selbiges gilt für den MDV. Setzt man eine Mindestqualitätsstufe von SAQ D an, erreichen fast 35 % der umgelegten Luftlinienverbindungen nicht die Stufe D. Für den MDV erreichen fast 30 % der Quell-Zielbeziehungen nicht die Mindestanforderungen der verbindungsbezogenen Angebotsqualität. Dafür hat der RVB einen höheren Anteil bei den besonders hohen Qualitätsstufen der SAQ-Bewertung im Vergleich zum MDV.

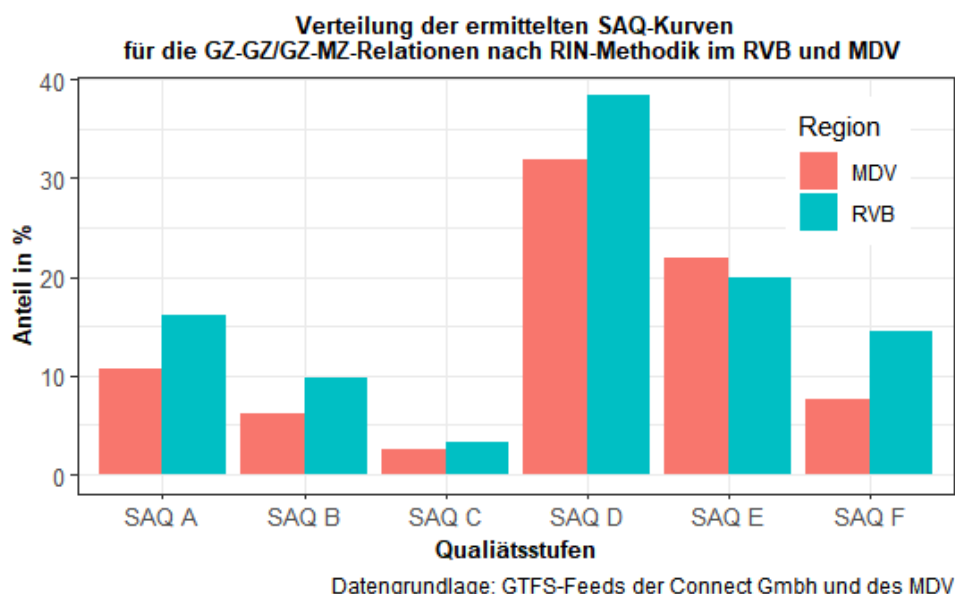


Abbildung 17 Verteilung der ermittelten SAQ-Kurven für die GZ-GZ/GZ-MZ-Relationen nach RIN 2008-Methodik im RVB und MDV

Die Verteilung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität für die Luftlinienverbindungen der VFS-II kann aus Abbildung 18 entnommen werden. Hier wird deutlich, dass insbesondere der

MDV über eine schlechte Ver- und Anbindung zwischen den ZO verfügt. Für den RVB zeigt sich, dass weniger als jede vierte Luftlinienverbindung die Ansprüche der SAQ-D nicht erfüllt. Dafür sind fast ein Drittel der SAQ-Bewertungen mindestens mit B bewertet, was für eine sehr gute Ver- und Anbindung zwischen den ZO spricht.

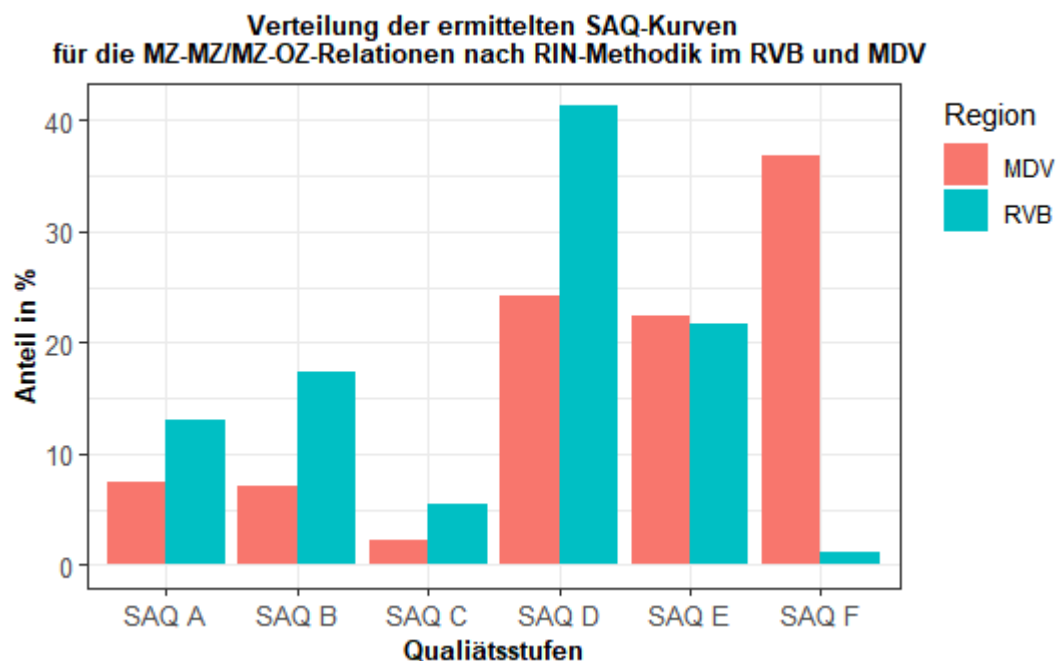


Abbildung 18 Verteilung der ermittelten SAQ-Kurven für die MZ-MZ/MZ-OZ-Relationen nach RIN-Methodik im RVB und MDV

Das Verfahren zur Identifizierung relevanter Verbindungen zeigt Schwächen:

Da es nur die Beförderungszeit sowie die Umsteigehäufigkeiten berücksichtigt, werden lange Zugangs- und Abgangszeiten in der Auswahl ignoriert. Sind die Bedingungen an das Reisezeitmodell als eher lasch definiert, werden ggf. Fahrten in die Analyse aufgenommen, die über sehr hohe Wartezeiten verfügen. Eine Abbildung des Raumes und seiner Strukturen kann nach der RIN 2008-Methodik auch nicht erfüllt werden.

6.2 Eine neue Methodik zur Analyse der Verbindungsqualität

Die Untersuchung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität nach den RIN 2008 zeigt methodische Schwächen. So findet sich an keiner Stelle eine inhaltliche Fundierung der Wahl der Luftlinienverbindungen über die Nachbarschaftsgrade. Zum einen kann bei Holthaus (o.J.) gelesen werden, dass die vorgeschlagene Methodik zur Identifizierung der Nachbarn nicht uneindeutig ist. So macht es einen Unterschied, ob man die Zentroide respektive die Anbindungspunkte wählt, um die Nachbarschaftsbeziehungen abzuleiten. Zum anderen muss die Frage gestellt werden, inwieweit Netze des ÖPNV im ländlichen Raum zwischen GZ, die Nachbarn zweiten Grades sind, gewährleistet werden müssen. Auf Grundlage dieser Überlegungen wird im Folgenden eine Alternativmethodik zur Identifizierung der Nachbarschaftsbeziehungen vorgeschlagen, sowie eine alternative Ermittlung der Reisezeiten angewandt.

In den RIN 2008 werden auf Grundlage der MKRO Zielgrößen zur Erreichbarkeit von Nachbarschaftsgemeinden gleicher oder höherer Zentralität für den mIV und den ÖV vorgeschlagen. Diese Zielvorgaben dienen als Grundlage zur Identifizierung der Luftlinienverbindungen. In Abhängigkeit der Reisezeiten zu den Nachbargemeinden gleicher Zentralität werden für alle Haltestellen in einer Gemeinde vektorbasierte Isochronen berechnet, welche in der HVZ die erreichbare Fläche repräsentieren. Diese mögliche erreichbare Fläche wird mit den bewohnten Zensuszellen mit 100 m Kantenlänge verschnitten. Sofern sich eine Zensuszelle mit der vektorbasierten Isochrone berühren, wird diese Gemeinde als Nachbar aufgefasst. Am Ende liegen für jeden zentralen Ort eine Menge an n Gemeinden gleicher respektiver nächsthöherer Zentralität vor.

Die so ermittelten Nachbarschaftsbeziehungen werden sodann gewählt, um zwischen allen Nachbarn Luftlinienverbindungen zwischen allen bewohnten Gitterzellen mit 300 m Kantenlänge zu bilden. Es wird also nicht nur ein Anbindungspunkt pro Gemeinde untersucht - eine Analyse der innerörtlichen Zentralitäten wird ausgeklammert - sondern zwischen allen bewohnten Zellen.

In nachfolgender Abbildung 19 sind für zwei Gitterzellen beispielhaft die Matrizen grafisch aufbereitet. Durch diese Methode wird eine hohe räumliche Auflösung sichergestellt und bessere Abbildung des ÖV-Angebots ermöglicht.

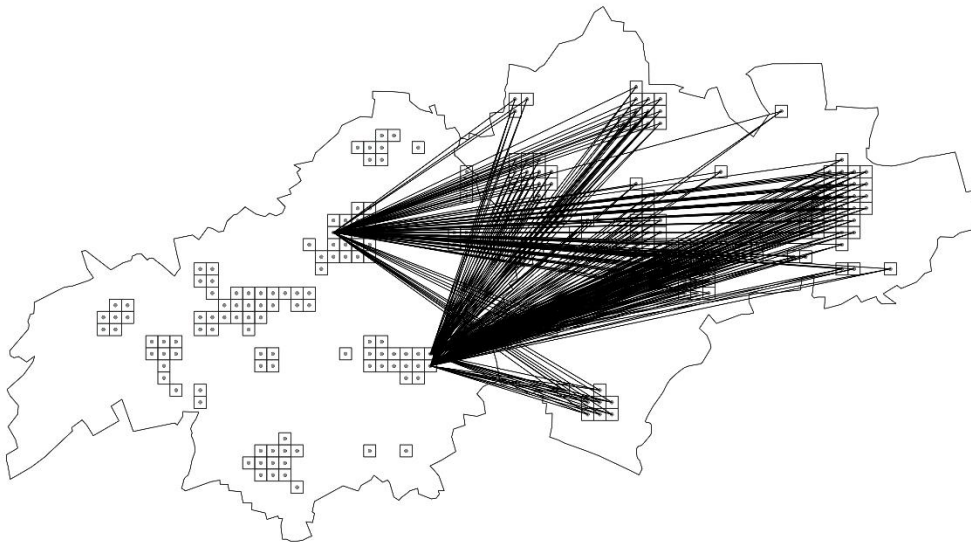


Abbildung 19 Alternativmethode zur Ermittlung der SAQ-Bewertungen in Anlehnung an Holthaus (o.J.)

6.2.1 Verfahren zur Wahl der Verbindungen

Der hier entwickelte Methodenansatz hat zum Ziel, die Reisezeiten zwischen ZO auf einem georeferenzierten Gitter zu berechnen. Im Gegensatz zur RIN 2008-Methodik werden zwischen zwei Gemeinden gleicher Zentralität und ohne Berücksichtigung der innerörtlichen Zentren nicht nur zwei Anbindungspunkte untereinander verbunden, sondern es werden x bewohnte Gitterzellen mit y bewohnten Gitterzellen einer anderen Gemeinde in Form einer Matrix aufbereitet. So ergibt

sich beispielsweise bei der Untersuchung der Verbindungsqualität in Braunschweig auf einem Gitter mit 300 m Kantenlänge eine umzulegende Matrix von rund 993.000 Relationen. Nach Umlegung der Matrix liegen im Ergebnis ca. 15,2 Millionen berechnete Verbindungen vor. Da nicht alle plausibel erscheinen, muss ein Vorgehen evaluiert werden, welches nur die Verbindungen wählt, die realistische Reisezeiten beschreiben. Dies ist vor allem für die Untersuchung der Luftlinienverbindungen im ländlichen Raum notwendig. Nachfolgend werden einige Ansätze aus der Forschung gegenübergestellt, welche Vorschläge zur Wahl geeigneter Verbindungen diskutieren. Insbesondere die Arbeit von Peter (2021) ist für den vorliegenden Kontext relevant, da auch er auf einem Gitter Reisezeiten berechnet.¹¹

Peter (2021) nimmt zur Identifizierung der relevanten umgelegten Relation das 20 %-Perzentil. Selbiges wählt er für die Umsteigehäufigkeit. Der Vorteil bei diesem Ansatz liegt darin begründet, dass das 20 %-Perzentil bei 5 berechneten Verbindungen je Relation im Umkehrschluss auch die schnellste Verbindung darstellt. Peter (2021) gibt es das bereits hier angewandte Verfahren der RIN 2008. Dies ist für die vorliegende Arbeit aber kaum nützlich, da dieser Ansatz Fahrzeiten- und nicht reisezeitenbasiert ist. Dabei stellen insbesondere die Zugangs-, Abgangs- und Wartezeiten die größte Herausforderung zur Identifizierung der relevanten Verbindungen dar.

In Abbildung 20 ist dieser Zusammenhang beschrieben und verdeutlicht die Schwierigkeit. In dieser Analyse wird ein Verhältniswert aus Fahr- zu Reisezeit berechnet. Das Verhältnis kann Hinweise darauf liefern, inwieweit die Zugangs-, Warte- und Abgangszeit eine Rolle spielen. Dabei wird deutlich, dass sich das Verhältnis für beide Untersuchungsregionen unterscheidet. Auch hier zeigt sich, dass GTFS-Analysen Raumstrukturen sichtbar machen können. Zum anderen wird ersichtlich, dass der gewählte Ansatz der RIN 2008 zur Wahl relevanter Verbindungen nicht geeignet ist.

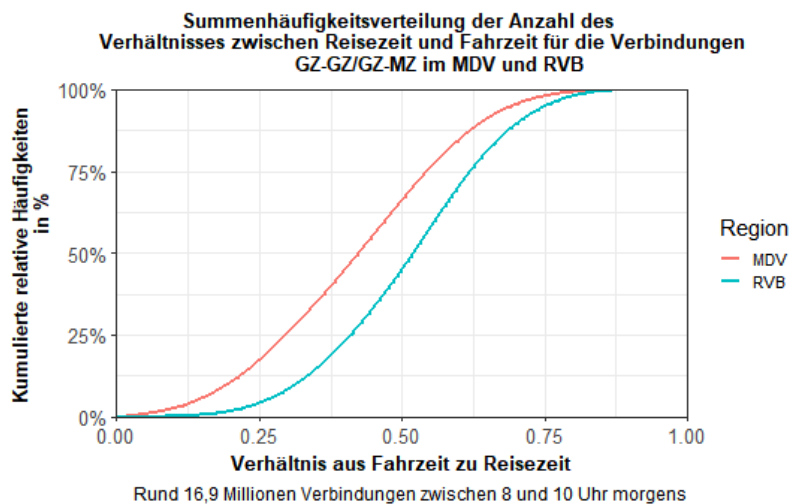


Abbildung 20 Vergleich der Summenverteilungen des Verhältnisses zwischen Fahr- zu Reisezeit

¹¹ In einem ersten Schritt werden solche Verbindungen ausgeschlossen, bei denen die Ankunftszeit einen Tag später vorliegt. Diese Fahrten werden pauschal nach folgender Regel identifiziert: Falls die Uhrzeit des Reiseantritts größer als die Uhrzeit des Ankunfts ist, wird diese Verbindung ignoriert. Dieser Schritt erfolgt vor der eigentlichen Analyse. Zudem werden nur die Fahrten betrachtet, welche im Zeitraum zwischen 8 und 10 Uhr starteten. So wird sichergestellt, dass die HVZ abgedeckt wird.

Hieraus folgt also, dass eine Methode benötigt wird, welche nicht nur die minimale Reisezeit bewertet, sondern ein gutes Abbild der verbindungsbezogenen Angebotsqualität in der morgendlichen HVZ ermöglicht. Aus der Erreichbarkeitsforschung sind Widerstandsfunktionen bekannt, die Zielvorgaben (Beta-Werte) aufgreifen. Dieses Verfahren wird u.a. bei der Verkehrsmittelwahl im klassischen 4-Phasenalgorithmus angewandt. Im Kern ist dieser Ansatz mikroökonomisch fundiert und beschreibt beispielsweise in Form einer Nutzenfunktion die Moduswahl des Verkehrsmittels. (vgl. hierzu Ahlmeyer und Wittowsky (2018), die aus empirischen Erhebungen Widerstandsfunktionen für unterschiedliche Verkehrsmodi ableiten.)

Der widerstandsbasierte Ansatz kann für die vorliegende Arbeit nach Wessel und Farber (2019; Ahlmeyer und Wittowsky) hilfreich sein, da er die ganze Fahrtenkette betrachtet und Zielgrößen berücksichtigt. Wessel und Farber (2019) zeigen ein Verfahren, welches Zielvorgaben aufgreift und in Abhängigkeit dieser eine Widerstandsfunktion modellieren und diese Widerstände für jede Verbindung berechnen. In den RIN 2008 liegen Zielvorgaben der MKRO vor, welche als Beta-Werte verwendet werden können, um die Widerstände zu berechnen. Es wird also für jede Verbindung einer Relation mittels folgender Formel $f(t_{Reisezeit}) = e^{-t_{Reisezeit}/\beta}$ ein Widerstand ermittelt. Die auf Grundlage der MKRO definierten Zielgrößen zur Erreichbarkeit zentraler Orte (gleicher Zentralitätsstufe) liegen für die Erreichbarkeit des Wohnstandortes zu ZO vor und für die Erreichbarkeit eines ZO zu einer Gemeinde gleicher Zentralität. Da sie aber nur die Reisezeiten zwischen den nächsten Nachbarn gleicher Zentralität berücksichtigen, der entwickelte Verfahrensansatz die Nachbarschaftsbeziehungen über die vektorbasierten Isochronen ableitet, muss eine Differenzierung an dieser Stelle nicht stattfinden. Liegt also beispielhaft eine Luftlinienverbindung zwischen einer bewohnten Zelle x und der Zelle y in einer anderen Gemeinde gleicher Zentralität vor, werden für die GZ-Relationen ein Beta-Wert von 60 Minuten gewählt. Die MKRO schlagen für benachbarte Gemeinden gleicher Zentralität 45 Minuten vor. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2009) Da die Analysen aber auf einem Gitter erfolgen - also eine Annäherung an Wohnstandorte gegeben ist - ist eine gröbere Abbildung zugänglicher. Über die Darstellung der Widerstandsfunktion nach Wessel und Farber (2019) im Bezug zur Zielgröße der MKRO wird das Spektrum der Reisezeiten deutlich und es kann aufgezeigt werden, welche Schwächen im ländlichen Raum vorliegen. Der so erfolgte Ansatz bietet die Chance, nur solche Verbindungen zu untersuchen, welche das Kriterium nach MKRO im Ansatz erfüllen. Ab wann das Kriterium als erfüllt angenommen werden kann, ist eine planerische Frage. Da die vorliegende Methodik aber das Ziel verfolgt, möglichst kleinräumig Kenngrößen des ÖV zu berechnen, muss ein anderes Kriterium her, welches nicht die Auswahl der Grundgesamtheit in dem Maße beschneidet.

In der Literatur liegen empirische Kenntnisse zu der Bedeutung der einzelnen Elemente einer Fahrtenkette vor. Es ist dokumentiert, inwieweit beispielsweise die Gehweite einen Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl in einer Stadt hat. Bei Tsakarestos (2014) kann entnommen werden, dass entscheidende Kriterien bei der (subjektiven) Bewertung relationsbezogener Qualitäten die Verkehrszeiten, die maximalen Gehweiten, sowie die Umsteigewartezeiten und -häufigkeiten sind. Ein Ansatz zur Bestimmung relevanter Verbindungen könnte also in der Analyse der maximalen Wartezeiten bzw. die Einhaltung von Vorgaben aus der Nahverkehrsplanung liegen. Zielgrößen finden sich bei Kirchhoff und Tsakarestos (2007), die normativ festgelegt sind. Diese Zielgrößen werden in Abhängigkeit der Quell-Zielrelationen sowie in Abhängigkeit des Verkehrsmittels beschrieben.

Friedrich (1994) stellt in seiner Arbeit Umlegungsverfahren für den ÖPNV vor, die Umsteigewartezeiten in Abhängigkeit der Fahrzeugfolgezeiten festlegen. Durch die Berechnungen der Fahrzeugfolgezeiten (vgl. Abbildung 11) kann theoretisch für jede einzelne Verbindung in Abhängigkeit der ermittelten Nutzungsdichte nach Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2019) eine differenzierte maximale Wartezeit bestimmt werden. Diese Differenzierung muss in dieser Schärfe aber nicht getroffen werden. Denn wenn man das Kriterium der maximalen Umsteigewartezeiten¹² nach Kirchhoff und Tsakarestos (2007) anwendet, so zeigt sich in Abbildung 21, dass das Verhältnis zu Fahr- und Reisezeiten hinsichtlich der Fahrzeit verbessert wird.

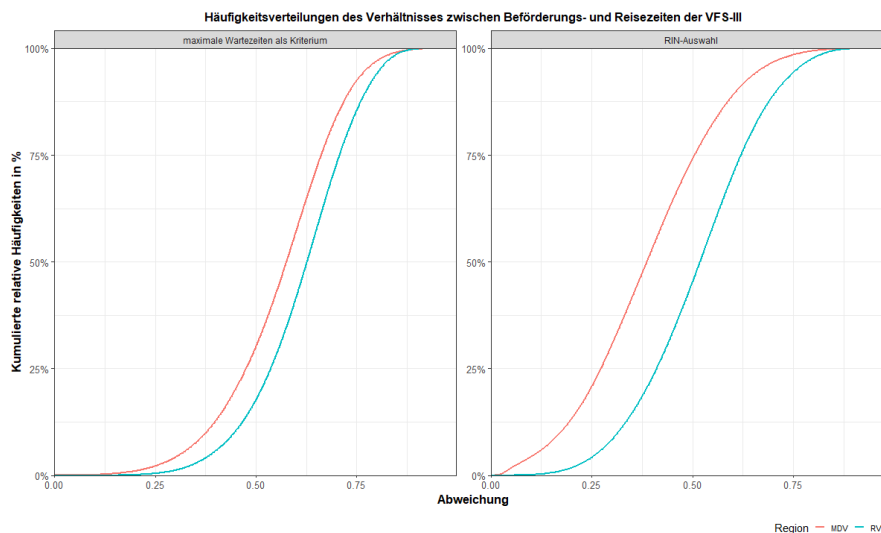


Abbildung 21 Summenhäufigkeitsverteilung der Anzahl des Verhältnisses zwischen Fahr- und Reisezeit für die VFS III im MDV und RVB

Trifft man die Annahme, dass Verbindungen umso attraktiver sind desto länger die Aufenthaltszeiten im Fahrzeug sind¹³, so ist die Abgrenzung der Verbindungen über maximale Wartezeiten als sinnvoll anzusehen. Die Wartezeiten liegen je nach Raumtyp bei 7,5 Minuten bis 15 Minuten und werden für jede Relation mit der Anzahl der Umsteige multipliziert.

In der Analyse der Verbindungen werden also alle Relationen betrachtet, welche das Kriterium erfüllen. Aus diesen Relationen wird dann der Median der Reisezeit zur Identifizierung der maßgeblichen Verbindung gewählt. Im Anhang befinden sich die Median-Reisezeiten der GZ und MZ für beide Regionen.

6.2.2 Wahl der Rasterzellengröße

Den Einfluss der Zellengröße zur Ermittlung relationsbezogener Kenngrößen wird in der fachwissenschaftlichen Literatur seit Längerem diskutiert. (Friedrich) stellt fest, dass die Aussagegenauigkeit mit zunehmender Zellengröße sinkt. Peter (2021) stellt in seiner Arbeit die räumliche Aggregation in Erreichbarkeitsmodellen umfangreich dar und zeigt auf, welche Effekte bei der räumlichen Aggregation erzeugt werden. Rastereinheiten stellen immer eine Aggregation räumlicher

¹² Inkl. der uhrzeitlichen Kriterien, die schon den Raum der möglichen Verbindungen einschränken.

¹³ In der Verkehrsmodellierung liegen Arbeiten vor, welche unterschiedliche Parameter für die Schätzung der Nutzenfunktion zwischen Aufenthaltszeiten im Fahrzeug und außerhalb des Fahrzeugs modellieren und die Aufenthaltszeit im Fahrzeug als angemessener darstellen. Kim und Lee 2019.

Informationen dar. Für die vorliegende Arbeit geht es entgegen der geeigneten Aggregation räumlicher Daten primär darum, ein praktikables Gitter bereitzustellen, welches neben einer hohen räumlichen Auflösung auch eine Handhabbarkeit hinsichtlich der Rechenzeit liefert.

Im Folgenden werden unterschiedliche Gittergrößen zur Berechnung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität der RIN 2008 erprobt und die Verteilungen verglichen. Es soll gezeigt werden, dass die Wahl des Gitters mit 300 m Kantenlänge im Vergleich zum als Benchmark festgelegten Gitter mit 100 m Kantenlänge hinsichtlich der Kenngrößen kaum Unterschiede vorliegen.

Um eine Auswahl an Verbindungen zu haben, werden in einem ersten Schritt 10.000 zufällige Relationen zwischen den Gittern mit 100 m Kantenlänge erzeugt. Die so identifizierten Relationen werden auch für die 300 m-Gitter und 1 km-Gitter erzeugt. Neben der Untersuchung zufällig identifizierter Verbindungen und deren Einfluss unterschiedlicher Gittergrößen zur Ermittlung der Kenngrößen, werden auch für eine Beispielgemeinde Reisezeiten zu einem ZO untersucht. Dies hat den Vorteil, dass nicht für unterschiedliche Verbindungen Gittergrößen erprobt werden, sondern dass durchschnittliche Kennwerte unterschiedlicher Gittergrößen am Beispiel einer Gemeinde diskutiert werden können. Als Untersuchungseinheit wird eine verbindungsbezogene Analyse der Angebotsqualität für die Verbindungen zwischen Goslar (MZ) und Braunschweig (OZ) vorgeschlagen. In Braunschweig wird als Ziel der Hauptcampus der dort ansässigen Universität gewählt. Analysiert werden dort die Verteilungen hinsichtlich der Reise-, Beförderungs-, Zugangs- und Abgangszeiten. Als Anbindungsknoten wird der Zentroid der Zelle gewählt. Peter (2021) schlägt in seiner Arbeit zum Aufbau eines Erreichbarkeitsmodells bei der Verwendung unterschiedlicher Gittergrößen die Gittergrößen >100 über die Einwohnerverteilung zu gewichten und nicht den Mittelpunkt der Zelle zu wählen.

In Abbildung 22 ist eine Gegenüberstellung der Fahrzeiten beider Untersuchungseinheiten mit unterschiedlichen Gittergrößen dargestellt. Die Häufigkeitsverteilung zeigt für die zufällig identifizierten Gittergrößen eine ähnliche Verteilung für die Fahrzeiten, wenn der Median der Verbindungen je Luftlinienverbindung gewählt wird.

Für die Relationen zwischen Goslar und dem Campus der TU Braunschweig auf einem unterschiedlichen Gitter zeigt sich, dass die Fahrzeitenverteilungen differieren.

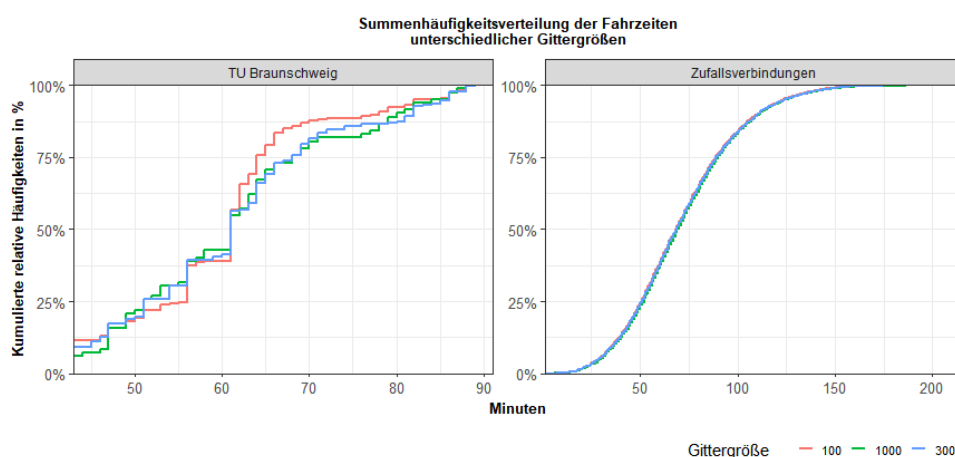


Abbildung 22 Gegenüberstellung der Fahrzeiten unterschiedlicher Gittergrößen für die Zufallsrelationen, sowie die Relationen zwischen Goslar und dem Campus der TU Braunschweig

Bezieht man hingegen die Reisezeit als Vergleichsgröße ein (Abbildung 23), so zeigt sich, dass die Reisezeiten zwischen den Gittern für die Verbindungen zwischen Goslar und der TU Braunschweig divergieren. Für die Gittergrößen mit 100 m und 300 m Kantenlänge zeigen sich geringere Abweichungen als zwischen der 100 m Kante, die als Benchmark dient und dem 1 km Gitter. Für die Zufallsverbindungen fällt der Unterschied hingegen auch für die Reisezeiten nicht ins Gewicht.

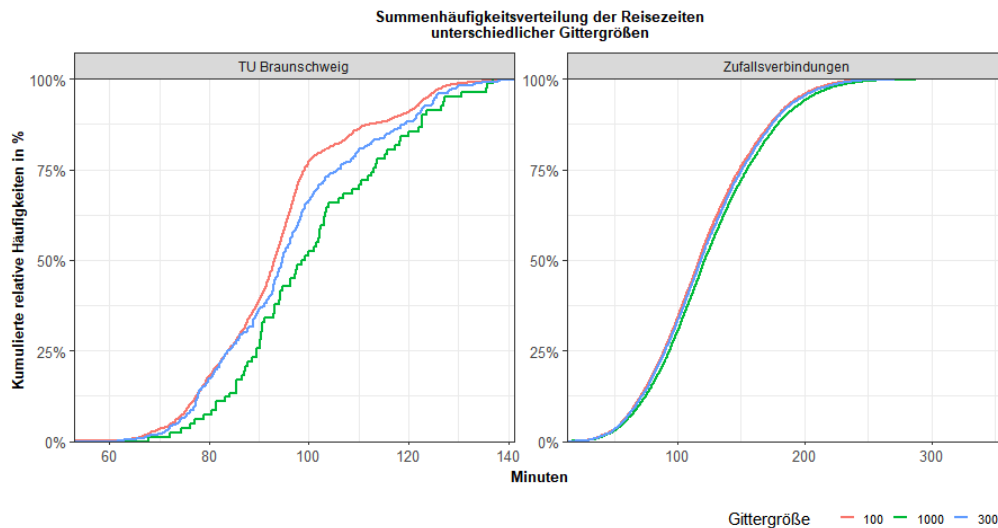


Abbildung 23 Gegenüberstellung der Reisezeiten unterschiedlicher Gittergrößen für die Zufallsrelationen, sowie die Relationen zwischen Goslar und dem Campus der TU Braunschweig

Die Gegenüberstellung der Rasterzellengröße zeigt also, dass die Wahl des Gitters mit 300 m Kantenlänge für die Analyse eine ausreichend gute Genauigkeit der Fahr- und Reisezeiten liefert und dabei noch die Rechenzeit wesentlich reduziert. Eine Ausweisung auf einem kleinräumigeren Gitter erzielt im Umkehrschluss keine größeren Vorteile, sodass als Analyseeinheit das aggregierte Gitter mit 300 m Kantenlänge genügt. Hingegen zeigt die kurze Gegenüberstellung, dass das Geogitter mit 1 km Kantenlänge zu ungenau wird und die Abweichungen insbesondere durch die Zugangs- und Abgangszeiten bedingt werden.

6.2.3 Analyse der Verbindungen der VFS-III

Für beide Regionen sind nach der hier vorgestellten Methodik Luftlinienverbindungen zwischen allen bewohnten Gitterzellen mit einer Kantenlänge von 300 m erzeugt, die in einer Nachbarschaftsbeziehung zueinanderstehen. Es liegen rund 4,36 Millionen Relationen vor. Nach Anwendung des Kriteriums der maximalen Wartezeit ergibt sich eine Grundgesamt von rund 1 Millionen Median-Luftlinienverbindungen, die zur Ermittlung der SAQ-Kurven verwendet werden.

Die Gegenüberstellung der Qualitätskriterien in Abbildung 24 unterscheidet sich erheblich zwischen beiden Methodiken, wenn man die Abweichungen der maßgeblichen Luftliniengeschwindigkeiten auf den Relationen vergleicht. Die Analyse auf dem Gitter erfasst in einem viel genaueren Rahmen die tatsächlichen Reisezeiten zwischen den zentralen Orten. Dadurch wird eine bessere Abbildung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität hergestellt. Interessant ist, dass je nach Methodenwahl die Anteile der SAQ-Qualitätsstufen zwischen den Regionen divergieren. Dies kann über das Kriterium der maximalen Umsteigewartezeit erklärt werden. Es sind also

womöglich anteilig viele schlechte Luftlinienverbindungen nicht mehr in die Ermittlung der Qualitätsstufen eingeflossen. Dass diese in der klassischen RIN 2008-Methodik berücksichtigt werden, ergibt sich aus dem Umstand, dass dort als Kriterium zur Auswahl möglicher Verbindungen die gewichtete maximale Beförderungszeit bemüht wird. Daneben fällt auf, dass die Gittermethode über weniger gute Verbindungen verfügt. Dies stützt die These, dass die RIN 2008 aktuell noch Verbindungen des ÖV durch die Anbindung zentraler Anbindungsknoten überschätzt. Im Anhang finden sich zudem die Reisezeitverteilungen der VFS differenziert nach den Gemeinden.

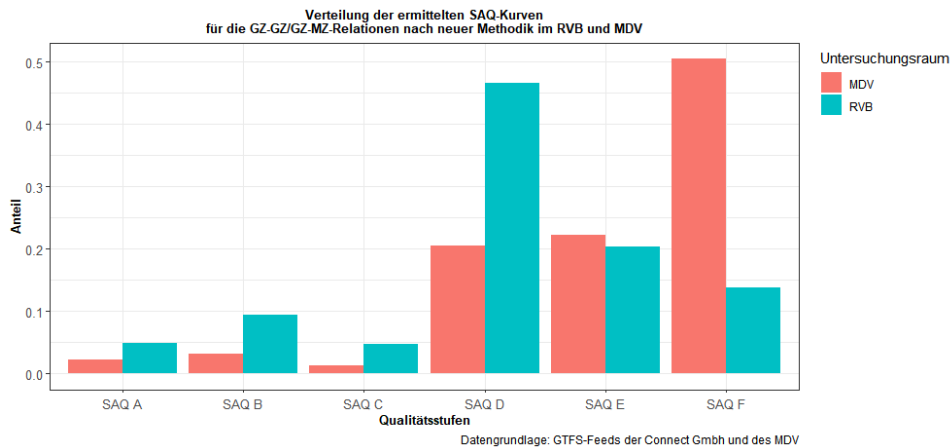


Abbildung 24 Verteilung der ermittelten SAQ-Kurven der VFS-III nach neuer Methodik im RVB und MDV

6.2.4 Analyse der Verbindungen der VFS-II

Zur Analyse der VFS-II werden rund 5,5 Millionen Relationen untersucht. Auch hier zeigt sich, dass eine Verschlechterung der Qualitätskriterien beobachtet werden kann.

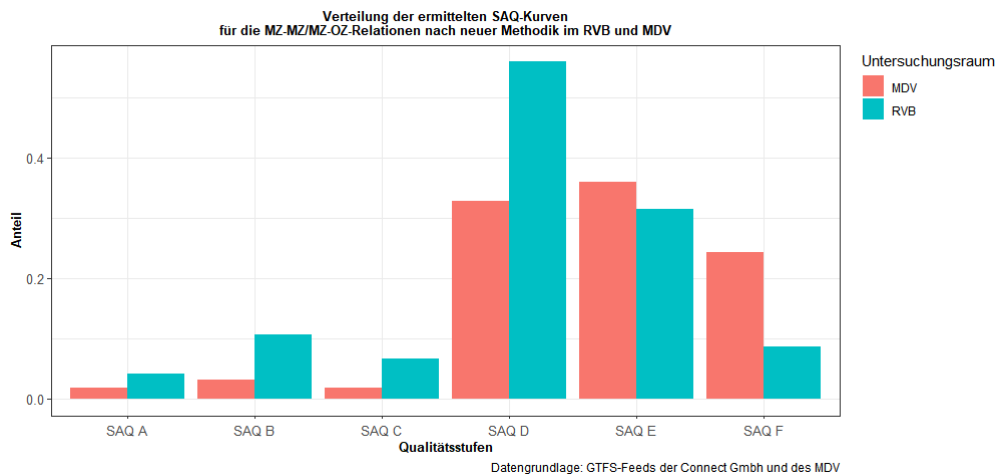


Abbildung 25 Verteilung der ermittelten SAQ-Kurven der VFS-II nach neuer Methodik im RVB und MDV

Die Analyse auf dem Gitter kann also für beide VFS zeigen, dass eine genauere Abbildung durch den gitterbasierten Ansatz erfolgt. Neben der Analyse der VFS-II und III werden nachfolgend auch innerstädtische Verbindungen untersucht.

6.2.5 Analyse kleinräumiger Verbindungen

Um auch kleinräumige Verbindungen in der Analyse und Schätzung neuer SAQ-Kurven zu berücksichtigen, werden Matrizen für die Städte Braunschweig und Halle an der Saale untersucht, welche alle bewohnten 300 m-Gitterzellen berücksichtigen. Um nur Verbindungen des ÖPNV zu untersuchen, werden bei der Abfrage des Modells alle *agencies* ignoriert, die regionale Schienenverkehre anbieten. So liegen im Ergebnis Kenngrößen zwischen allen bewohnten Rasterzellen für Verkehrsangebote des ÖPNV vor.

Da Quell-Zielbeziehungen im städtischen Kontext vorliegen, muss zuerst anhand eines Beispiels der rasterzellenbasierte Ansatz erläutert werden, um zu zeigen, dass modelltheoretisch nicht alle Entfernungsbereiche geroutet werden können.

In Abbildung 26 ist eine schematische Darstellung der Relationen zwischen den Zentroiden (rote Punkte) der Gitterzellen mit 300 m Kantenlänge (schwarze Gitter) dargestellt. Die Abbildung macht nochmal deutlich, dass im Nahbereich maximal Relationen auf einer Entfernung von höchstens 300 m Luftlinie abgebildet werden können. Diese Relationen werden durch die senkrechten Luftlinienverbindungen repräsentiert. Neben den Relationen mit höchstens 300 m folgen dann Relationen, die höchstens 425 m kurz werden können und über die Hypotenusen dargestellt werden. Dieser Zusammenhang ist bedeutsam, um die in Abbildung \ref{abb:schnellste_verb:bs} dargestellten Kennwerte der Luftliniengeschwindigkeiten zu verstehen.

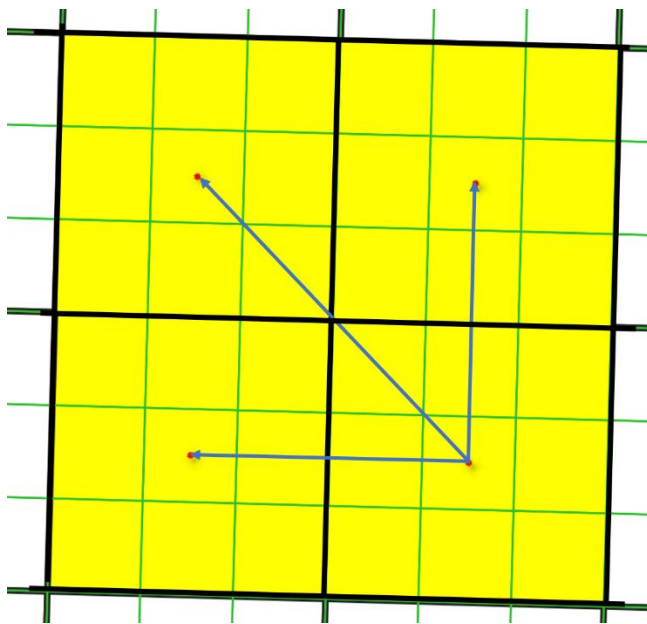


Abbildung 26 Modellhafte Darstellung des rasterzellenbasierten Umlegungsmodells

Kirchhoff und Tsakareostos (2007) schlagen für Busverkehre innerorts eine maximale Umsteigewartezeit von 10 Minuten vor. Da für die beiden untersuchten Städte jeweils auch ein Straßenbahnsystem vorliegt, wird eine maximale mittlere Umsteigewartezeit von 7,5 Minuten veranschlagt. Es werden also nur die Relationen untersucht, die innerhalb der vorgebenden maximalen Wartezeiten liegen. Neben den relationsbezogenen Kenngrößen können für den Vergleich der beiden Städte zudem weitere Kennwerte verglichen werden, es ist also eine Bewertung der Fahrpläne möglich mit Kennzahlen, die bei Anton Marauli (2011) beschrieben werden.\)

Als erste Kenngröße wird der relative Anteil der Direktverbindungen an allen Fahrten innerhalb der Netze verglichen. Diese Größe ergibt sich aus dem Quotienten aller Fahrten ohne Umstieg zu den Gesamtfahrten innerhalb eines Netzes. Der Vorteil dieser Kenngröße liegt darüber hinaus darin begründet, dass zudem die räumliche Verteilung des Anteilswertes verglichen werden kann. Es können also die Anteile der Direktverbindungen einer Zelle i zu allen anderen Zellen j in den Städten berechnet werden. Der Anteil der Direktverbindungen in Braunschweig und Halle sind nachfolgender Abbildung zu entnehmen. Für beide Städte zeigt sich, dass insbesondere die innenstadtnahen Bereiche über hohe Anteile verfügen.

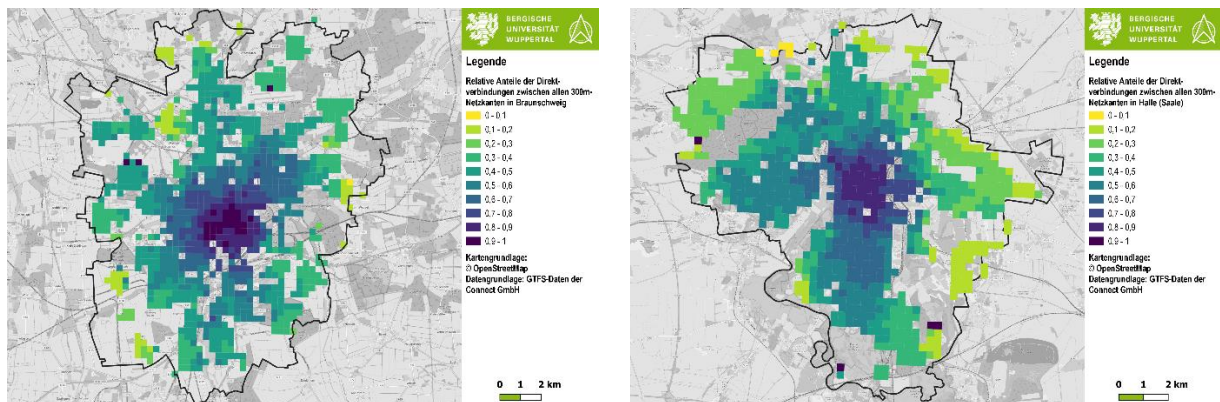


Abbildung 27 Relativer Anteil der Direktverbindungen in den Städten Braunschweig und Halle (Saale)

Nicht nur die Direktheit als Maß der Netzeffizienz ist eine Größe zur Beschreibung eines ÖPNV-Systems, sondern auch die Anzahl der Fahrten je Relation. Gidam et al. (2020) beschreiben in ihrer Arbeit ein Wahrscheinlichkeitsmaß, wie oft eine Fläche minütlich erreichbar ist. Greift man diesen Gedanken auf, so kann ein Maß entwickelt werden, welches quantitativ beschreibt, wie oft eine Luftlinienverbindung befahrbar ist. Bezieht man nicht nur eine Relation ein, sondern alle Quell-Zielbeziehungen auf einem Gitter in einer Stadt, so lässt sich ein gitterzellenbasierter Wert ausweisen. Nachfolgend werden alle Verbindungen gewählt, welche zwischen 8 und 10 Uhr starten und das Kriterium der Umsteigewartezeiten nach Kirchhoff und Tsakarestos (2007) erfüllen. Der Verhältniswert ergibt sich also als die Summe aller erreichbaren Zielzellen inklusive der Anzahl der Fahrten, die das Kriterium zu allen Zielzellen $\cdot 20$ erfüllen. Die Analyse zeigt in Abbildung 28, dass Braunschweig über eine besonders gute Flächenerschließung verfügt.

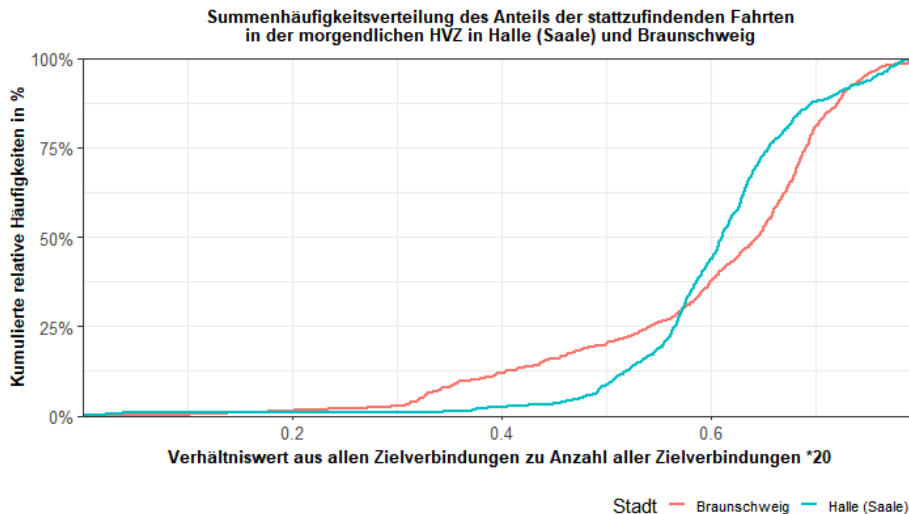


Abbildung 28 Verhältniswert aus Summe aller erreichbaren Zielzellen inklusive Anzahl der Fahrten, die das Kriterium erfüllen zu allen Zielzellen * 20

Mit den zulässigen Verbindungen in beiden Städten kann zudem eine Gegenüberstellung der Luftlinienentfernung zur Luftliniengeschwindigkeit erfolgen. Dabei wird der Median je Relation zwischen 8 und 10 Uhr morgens gewählt, welche in Abbildung 29 ist. An der Darstellung fallen die Lücken im Nahbereich auf. Diese ergeben sich aus der angewandten Gittermethodik, die nie Verbindungen untersuchen kann, die kürzer als 300m sind. (Vgl. dazu Abbildung 26)

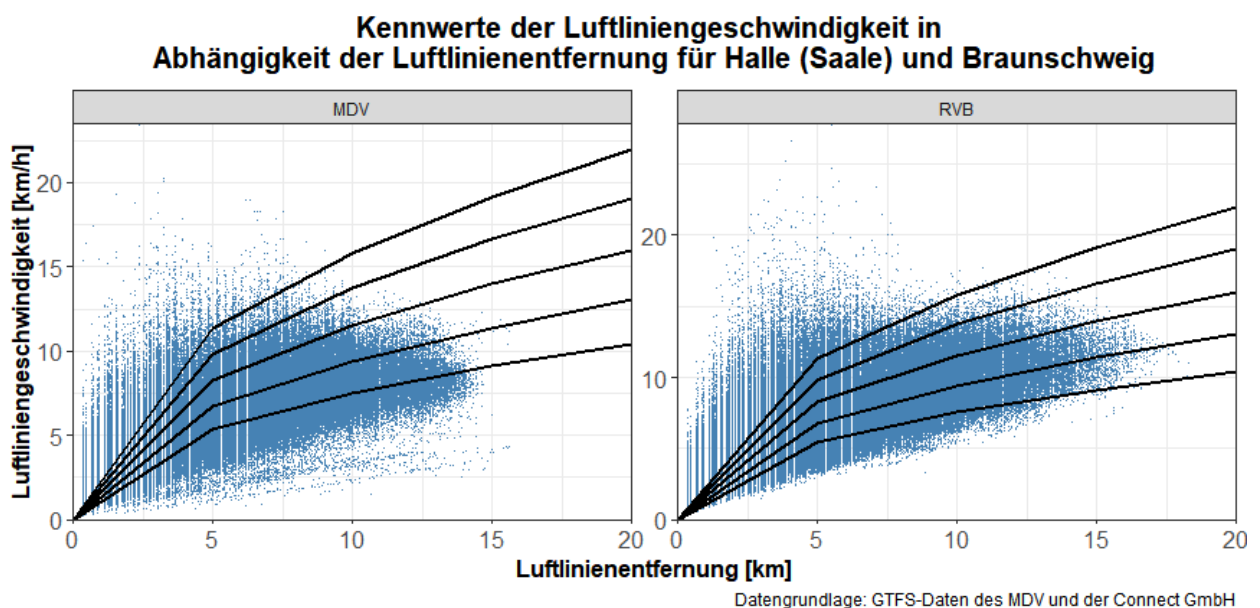


Abbildung 29 Kennwerte der Median-Luftliniengeschwindigkeit für alle Verbindungen in Braunschweig und Halle (Saale)

6.2.6 Analyse großräumiger Verbindungen in Niedersachsen

Um nicht nur regionale Verbindungen in der Analyse zu haben, werden für alle bewohnten 100 m-Gitterzellenkanten die Verbindungen zum Campus der TU Braunschweig berechnet. Dies

ermöglicht die Analyse weiterer Verbindungen, die über eine größere Luftliniendistanz verfügen. Der Vollständigkeit halber wird zudem die räumliche Verteilung der Reisezeiten dargestellt.

Beim Betrachten der Kennwerte der Luftliniengeschwindigkeiten in Abbildung 31 zeigt sich, dass die aktuellen SAQ-Kurven die schnellste Luftliniengeschwindigkeit je Relation gut abbilden. Dies kann damit zusammenhängen, dass in die Analyse der SAQ-Kurven fast ein Sechstel der Verbindungen Relationen der VFS-I und II in die Schätzung der Kurven RIN 2008 berücksichtigt worden sind. Außerdem nimmt in steigender Luftliniendistanz die Luftliniengeschwindigkeit zu. Auf den kurzen, regionalen Relationen liegen die Schwächen des ÖV. Für die Analyse überregionaler Relationen zeigt die Auswertung, dass die aktuell zur Verfügung stehenden SAQ-Kurven gut die verbindungsbezogene Angebotsqualität abbilden.

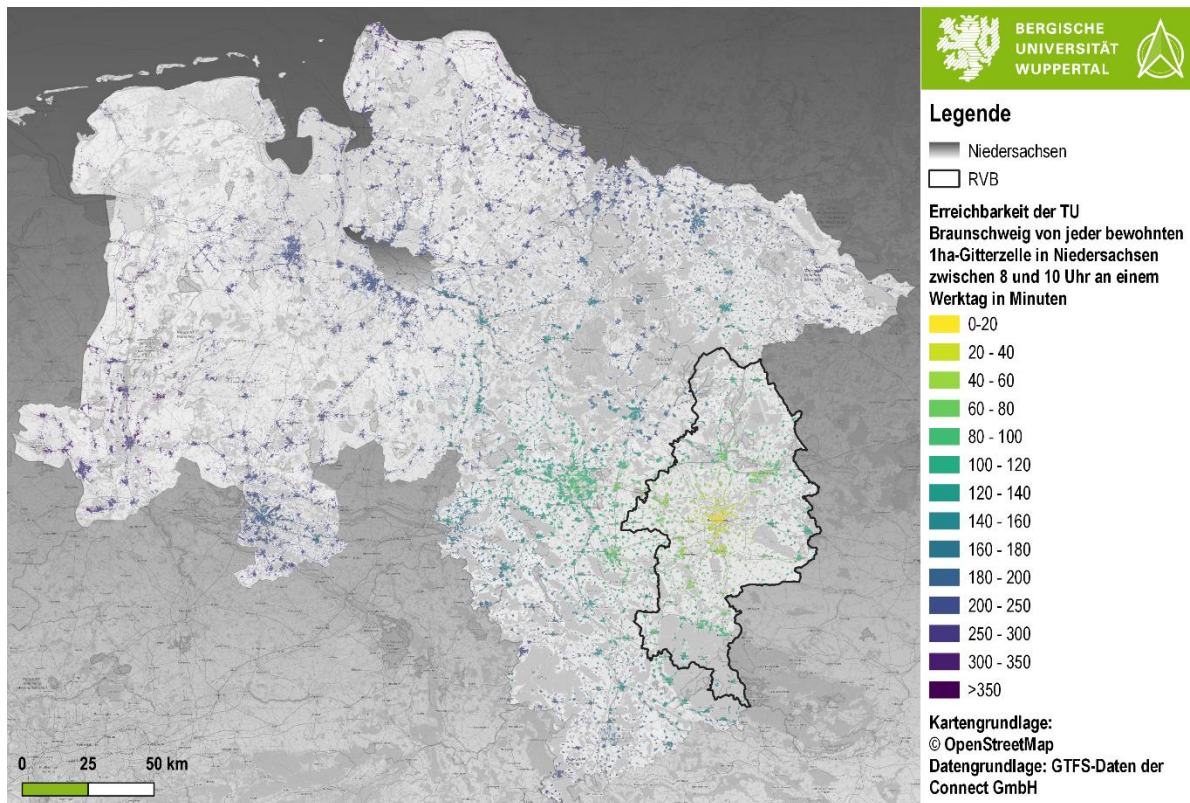


Abbildung 30 Räumliche Verteilung der aggregierten Reisezeiten zu dem Campus der TU Braunschweig

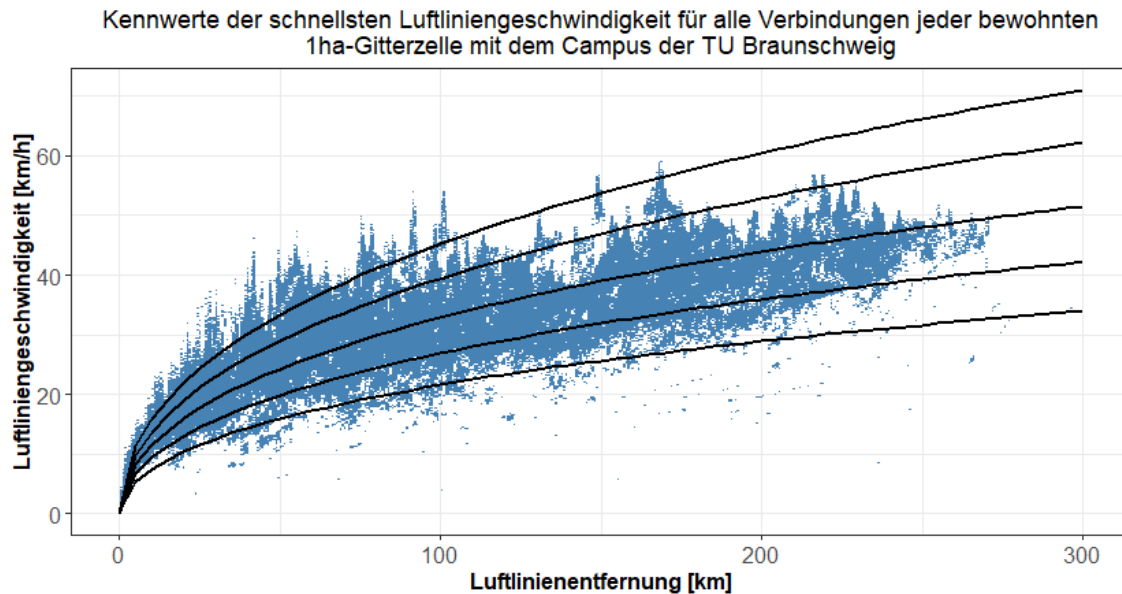


Abbildung 31 Kennwerte der schnellsten Luftliniengeschwindigkeit für alle Verbindungen jeder bewohnten 1ha-Gitterzelle zum Campus der TU Braunschweig

6.3 Schätzung der SAQ-Kurven

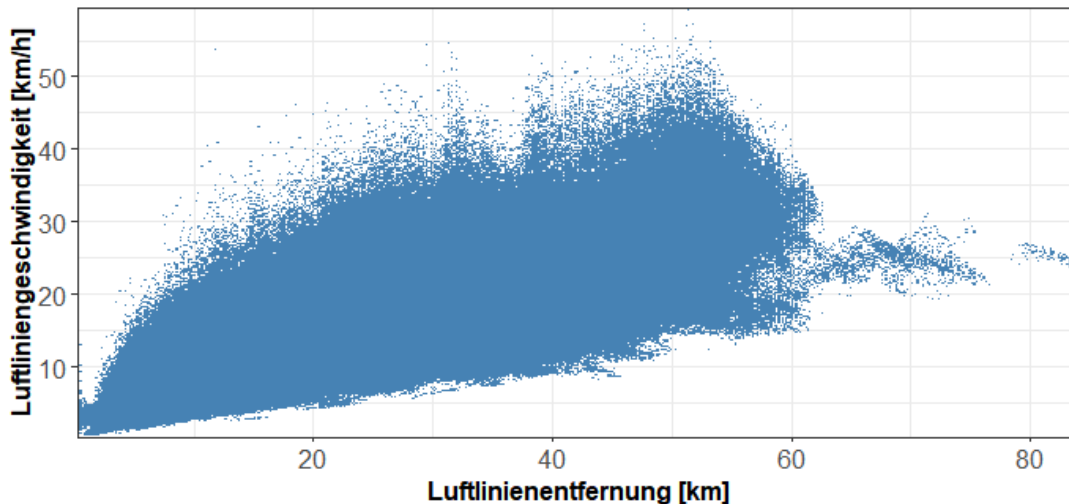
Die Schätzung der SAQ-Kurven wird in den RIN 2008 beschrieben. In der dortigen Vorgehensweise werden die Parameter a , b und c so geschätzt, dass die mittlere quadratische Abweichung der beobachteten Werte minimal wird. Die Abstände der Kurven sind so gewählt, dass 60 % der Relationen im Bereich der Stufen A bis C liegen und rund 40 % im Bereich D bis F. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2009) Ein anderes Vorgehen beschreibt Klemmer (2016) Die Schätzung der SAQ-Kurven erfolgt nach dem dort beschriebenen Verfahren. Dabei wird in einem ersten Schritt mittels der logarithmischen Regression ein Kurvenverlauf der Form $y = a * \ln(x) + b$ aus den Luftliniengeschwindigkeiten der Verbindungen ermittelt. Die daraus resultierende Kurve wird dann als Grenze zwischen den Stufen der Angebotsqualität B und C festgelegt. Die anderen Kurven werden über gleiche Abstände zu der Referenzkurve verschoben. Die nach der Regression ermittelte Variable b wird nach Klemmer (2016) durch drei geteilt, um gleiche Abstände zu gewährleisten. Die Grenze zwischen A und B wird mittels Addition des berechneten Abstandes hergeleitet.

In die Ermittlung der Angebotskurven werden alle Verbindungen einbezogen, welche das eingeführte Kriterium nach Kirchhoff und Tsakareostos (2007) erfüllen. Da die vorliegende Arbeit hauptsächlich Verbindungen im Nahbereich untersucht, werden zur Schätzung der neuen Kurven die Relationen der VFS-II und III einbezogen. Es werden zur Schätzung der Kurven die maximalen Luftliniengeschwindigkeiten je Relation gewählt. Es werden ca. 9,6 Millionen Relationen zwischen 8 und 10 Uhr identifiziert, welche in die Schätzung der Regression berücksichtigt werden. Die Quantile, Minima, Maxima und Median werden nachfolgend genannt.

Die minimale Luftliniengeschwindigkeit beträgt 0.3614 km/h, das erste Quantil liegt bei 11.8681 km/h, der Median ist 15.6822 km/h. Der Durchschnitt liegt bei 16.0821 km/h, das dritte Quantil bei 19.6484 km/h und die maximale zu erzielende Luftliniengeschwindigkeit ist 59.5264 km/h schnell.

Die zur Bestimmung der Regressionskurve relevanten Wertepaare zwischen der Luftlinienentfernung und der Luftliniengeschwindigkeit können Abbildung 32 entnommen werden.

Wertebeziehungen zwischen Luftlinienentfernung und Luftliniengeschwindigkeit für die VFS II und III

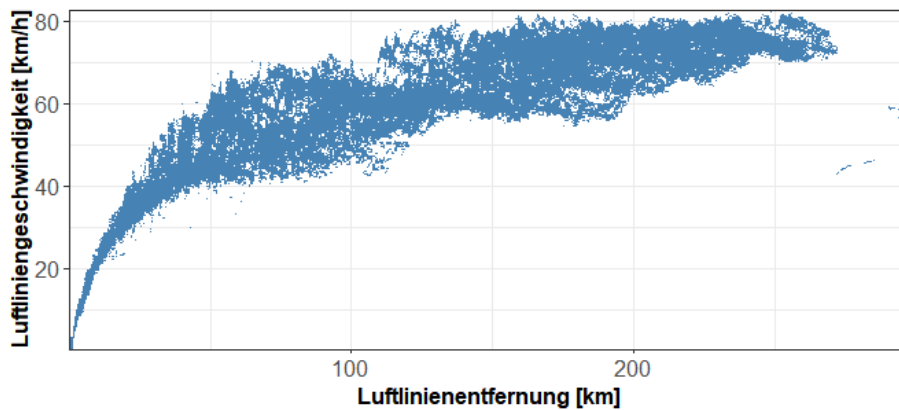


Datengrundlage: GTFS-Daten des MDV und der Connect GmbH

Abbildung 32 Wertebeziehungen zwischen Luftlinienentfernung und Luftliniengeschwindigkeit für die VFS II und III

Die Streuung der Datenpunkte ist durch die hier angewandte Untersuchungsmethodik erklärbar und die dadurch bedingten systemischen Schwächen des ÖV. Zieht man die Luftliniengeschwindigkeiten des mIV aus Abbildung 33 zwischen allen bewohnten Geogrids mit 100 m Kantenlänge und dem Campus der TU Braunschweig als Beispiel heran, so zeigt sich, dass die Streuung der Daten mit steigender Luftlinienentfernung abnehmen. Dieser Zusammenhang kann RIN 2008-begingt erklärt werden. So werden dort pauschale Zugangs-, Parksuch- und Abgangszeiten zu den Reisezeiten hinzuaddiert. Dennoch macht der Vergleich die systemischen Schwächen des ÖV im ländlichen Raum sichtbar. Eine Streuung kann für den mIV in der Form nicht beobachtet werden.

Wertebeziehungen zwischen Luftlinienentfernung und Luftliniengeschwindigkeit für die Routen des mIV in Niedersachsen



Datengrundlage: Holthaus 2021

Abbildung 33 Wertebeziehungen zwischen Luftlinienentfernung und Luftliniengeschwindigkeit für den mIV zwischen allen bewohnten Gitterzellen und dem Campus der TU Braunschweig

Die These der systembedingten Streuung der Luftliniengeschwindigkeit für nahräumige Verbindungen kann auch argumentativ über die Darstellung aus Abbildung 31 untermauert werden. Die Darstellung verdeutlicht, dass mit zunehmender Luftlinienentfernung die Luftliniengeschwindigkeiten steigen und somit die heutigen SAQ-Kurven die Angebotsqualität adäquater abbilden. Der Zusammenhang, dass mit wachsender Luftlinienentfernung die Luftliniengeschwindigkeit steigt, kann auch bei einer Auswertung für NRW beobachtet werden. Dort wird GTFS-basiert auf einem Geogrid mit 100 m Kantenlänge die Reisezeiten des ÖV zwischen dem Bahnhof Mirke in Wuppertal und dem bewohnten Raster in NRW ermittelt. Das Ergebnis stützt die hier eingeführte These, dass die SAQ-Kurven für überregionale Verbindungen valide Qualitätskriterien liefern. In Abbildung 34 sind die Kennwerte der Luftliniengeschwindigkeit für NRW dargestellt.

Ermittlung der Angebotsqualität bei der Erschließung mit dem ÖV (n=538.224)

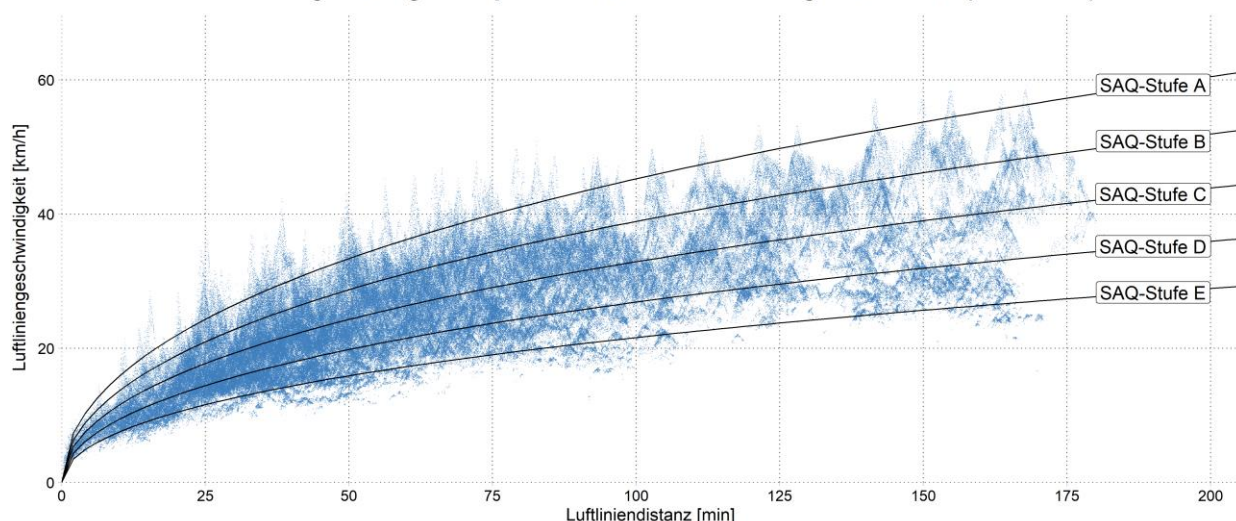


Abbildung 34 Ermittlung der Angebotsqualität bei der Erschließung mit dem ÖV in NRW, Groß (2021)

Auf Grundlage dieser Argumentation werden neue Kurven geschätzt, die speziell den Bereich bis 50 km abdecken sollen. Nach Anwendung der Regression ergibt sich für die Wertpaare aus Abbildung 32 folgende Formel: $y = -9.681312 + 8.349808 * \ln(x)$

R^2 wird mit 0.5273 ausgewiesen. Der negative Achsenabschnittswert folgt aus der Tatsache, dass nahräumige Relationen untersucht werden. Außerdem wird in dem negativen Achsenabschnitt deutlich, dass die verbindungsbezogene Angebotsqualität im ländlichen Raum als eher schlecht eingestuft werden muss.

Die resultierenden SAQ-Kurven in Abbildung 35 zeigen die Schwierigkeit der Schätzung neuer Kurven auf Grundlage von Verbindungen im ländlichen Raum. Negative Luftliniengeschwindigkeiten sind theoretisch nicht möglich. Dass die Schätzung dennoch Kurven erzeugt, die im negativen Bereich liegen, ergibt sich aus dem Modelfit, der nur auf den Daten aus der nahräumigen Analyse besteht.

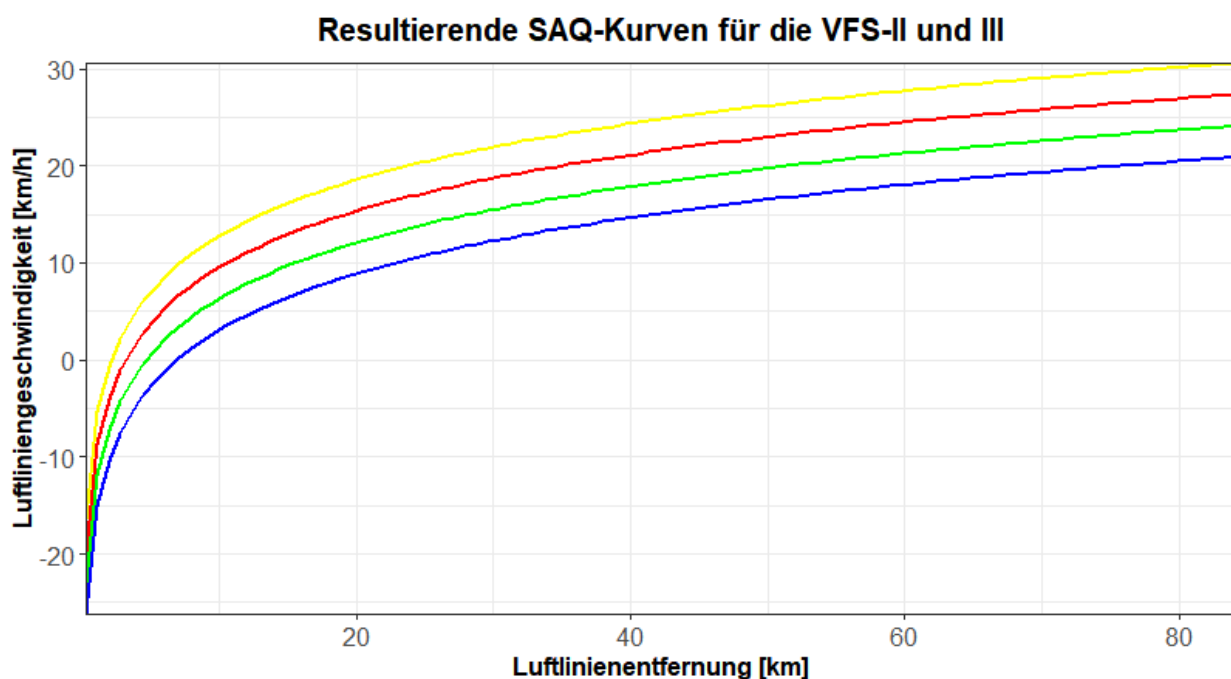


Abbildung 35 Resultierende SAQ-Kurven für die VFS-II und III

Die resultierenden SAQ-Grenzen ergeben sich wie folgt:

- **Grenze SAQ A/B:** $y = -6.454208 + 8.349808 * \ln(x)$
- **Grenze SAQ B/C:** $y = -9.681312 + 8.349808 * \ln(x)$
- **Grenze SAQ C/D:** $y = -12.908416 + 8.349808 * \ln(x)$
- **Grenze SAQ D/E:** $y = -16.13552 + 8.349808 * \ln(x)$

Um eine grobe Validierung der geschätzten Kurven in Abbildung 35 vorzunehmen, wird mit den ermittelten Luftliniengeschwindigkeiten zwischen Niedersachsen und dem Campus der TU Braunschweig (vgl. dazu Abbildung 30) eine resultierende Regressionskurve geschätzt. Die Statistiken der maximalen Luftliniengeschwindigkeiten sind folgender Auflistung zu entnehmen:

- minimale Luftliniengeschwindigkeit von 1.638 km/h
- erstes Quantil von 26.428 km/h

-
- Median von 32.620 km/h
 - Durchschnitt von 32.193 km/h
 - drittes Quantil 38.945 km/h
 - maximale Luftliniengeschwindigkeit von 59.087 km/h

Die resultierende Regressionskurve beträgt $y = -10.09232 + 9.37246 * \ln(x)$ bei einem R^2 von 0.6487. Der Vergleich zeigt, dass selbst die resultierende Regressionskurve großräumiger Verbindungen einen Achsenabschnitt b im negativen Wertebereich hat. Dies ist insoweit interessant, da die Wertepaare der großräumigen Verbindungen dennoch gut durch die SAQ-Kurven angenähert werden. (vgl. dazu Abbildung 31) Es kann also festgestellt werden, dass durch die systembedingte Schwäche des ÖV im ländlichen Raum SAQ-Kurven geschätzt werden, die einen negativen Achsenabschnitt haben.

Nachfolgend werden die resultierenden Kurven für den städtischen Bezugsraum dargestellt. Zur Schätzung der Angebotskurven werden rund 1,7 Millionen Relationen in den Städten Halle (Saale) und Braunschweig herangezogen. Die Statistiken des Datensatzes kann nachfolgender Aufzählung entnommen werden:

- minimale Luftliniengeschwindigkeit von 0.2202 km/h
- erstes Quantil von 6.3563 km/h
- Median von 8.1326 km/h
- Durchschnitt von 8.1552 km/h
- drittes Quantil 9.8567 km/h
- maximale Luftliniengeschwindigkeit von 35.7641 km/h

Die resultierende Regressionskurve ergibt sich zu $y = 3.878113 + 2.693208 * \ln(x)$ Für die städtischen Verbindungen ist der Achsenabschnitt nicht negativ. Dies stützt die These, dass die geringen erzielten Luftliniengeschwindigkeiten systemisch bedingt seien. Da in den beiden Städten ein ÖPNV-System existiert, welches mit dem miV konkurrieren kann, werden keine negativen Achsenabschnitte erzielt. In Abbildung 36 sind die Angebotskurven für die städtischen Relationen dargestellt.

Resultierende SAQ-Kurven für die Verbindungen in Braunschweig und Halle (Saale)

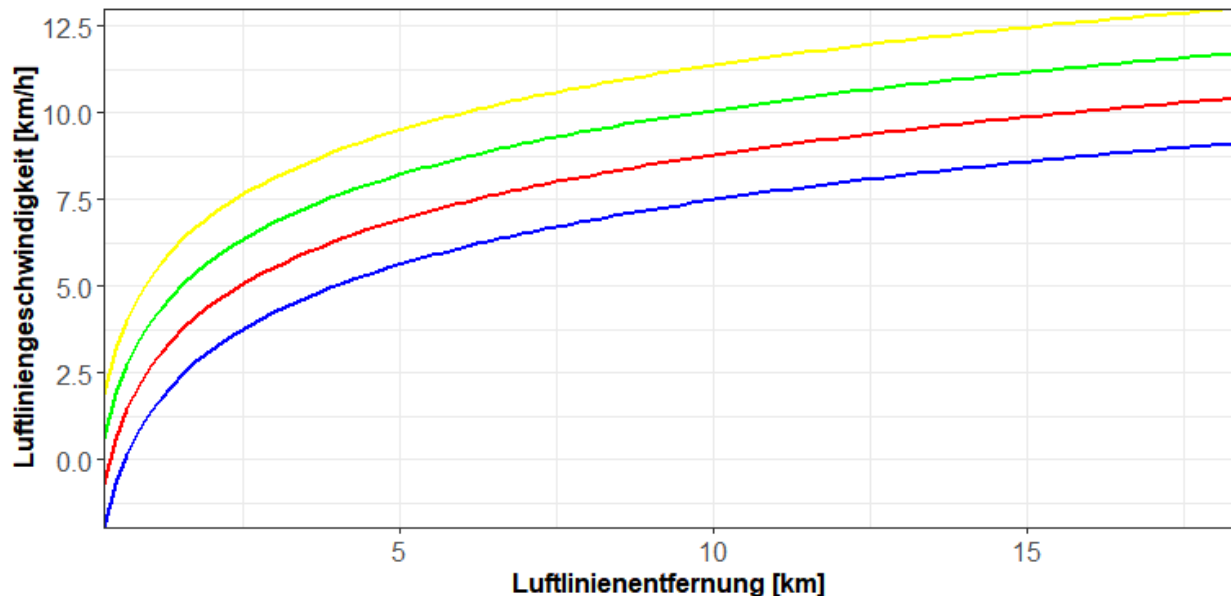


Abbildung 36 Resultierende SAQ-Kurven für die Städte Braunschweig und Halle (Saale)

Damit kann die Zielformulierung unterstützt werden, dass für unterschiedliche Entfernungsbereiche SAQ-Kurven vorliegen sollen. Die Funktionen der SAQ-Kurven für die beiden Städte können nachfolgender Liste entnommen werden:

- **Grenze SAQ A/B:** $y = 5.1708173 + 2.693208 * \ln(x)$
- **Grenze SAQ B/C:** $y = 3.878113 + 2.693208 * \ln(x)$
- **Grenze SAQ C/D:** $y = 2.5854086 + 2.693208 * \ln(x)$
- **Grenze SAQ D/E:** $y = 1.292704334 + 2.693208 * \ln(x)$

Die Schätzung neuer Kurven hat zeigen können, dass die methodischen Verfahren in den RIN 2008 im ländlichen Raum für den ÖV an die Grenzen kommen. Dort liegen keine ÖV-Systeme in dem Sinne vor, wie sie in Städten existieren. Im Gegensatz zum mIV, der immer über ausreichende Netzqualitäten verfügt, liegen die Herausforderungen des ÖV im ländlichen Raum in der angemessenen Bereitstellung von adäquaten Verbindungen. Dies zeigt sich bei der Schätzung der Kurven.

Sowohl aber für die Stadt als auch für die Region zeigen die Analysen zur Schätzung neuer Kurven, dass die SAQ-Kurven der RIN 2008 die verbindungsbezogenen Angebotsqualitäten nicht plausibel abbilden. Es werden also neue Kurven für ÖV benötigt.

6.4 Vergleich mIV

Neben der Luftliniengeschwindigkeit werden auch als Kriterium die Reisezeiten zwischen dem ÖV und dem mIV betrachtet. Dem VDV folgend sollen neben der reinen Betrachtung der Erschließungs- und Bedienungsqualität auch Reisezeitvergleiche zur Bestimmung der Netzqualität einbezogen werden.

Folgende Zielgrößen werden in Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2019) definiert.

Qualitätsstufe	Qualitätsmerkmal Reisezeitverhältnis	Reisezeitverhältnis $t_{\text{ÖPNV}}/t_{\text{MIV}}$
A	sehr günstig	< 1,0
B	günstig	1,0 bis < 1,5
C	zufrieden stellend	1,5 bis < 2,1
D	gerade noch akzeptabel	2,1 bis < 2,8
E	schlecht	2,8 bis < 3,8
F	sehr schlecht	$\geq 3,8$

Abbildung 37 Reisezeitverhältnis ÖPNV/mIV, (Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) 2019)

Zur Analyse der Reisezeiten wird auf das in Holthaus (o.J.) parametrisierte Netzmodell für den mIV zurückgegriffen. Die Reisezeiten des mIV werden im belasteten Netz zwischen 7 und 11 Uhr gesucht. An jedes Netzelement des Modells sind die durchschnittlichen Geschwindigkeiten zwischen 7 und 11 Uhr als Gewichte hinterlegt. Im Ergebnis liegen für alle bewohnten Zellen auf dem 300 m-Kantenlängengitter Reisezeiten zwischen allen bewohnten Gitterzellen vor. Zur Verdeutlichung und Plausibilisierung ist in nachfolgender Abbildung 38 eine beispielhafte Darstellung der Erreichbarkeiten als Summe der Reisezeiten gewichtet mit den Einwohnern in der Zielzelle dargestellt. Die Berechnung der gravitationsbasierten Potentialfunktion hat den Vorteil, dass die gewichteten Reisezeiten mit den Einwohnern in den Zielzellen ein Hinweis über die Validität des Netzmodells liefern. Der Funktion folgend müssen insbesondere die Zellen über einen minimalen Potentialindikator verfügen, die räumlich nah geclustert an Zellen mit einem Attraktivitätsfaktor (Einwohner) liegen. Die aufgestellte These lässt sich für die Umlegung des mIV zweifelsfrei zeigen. Eine vertiefende Analyse zur Netzaufbereitung und Validität findet sich bei Holthaus (o.J.).

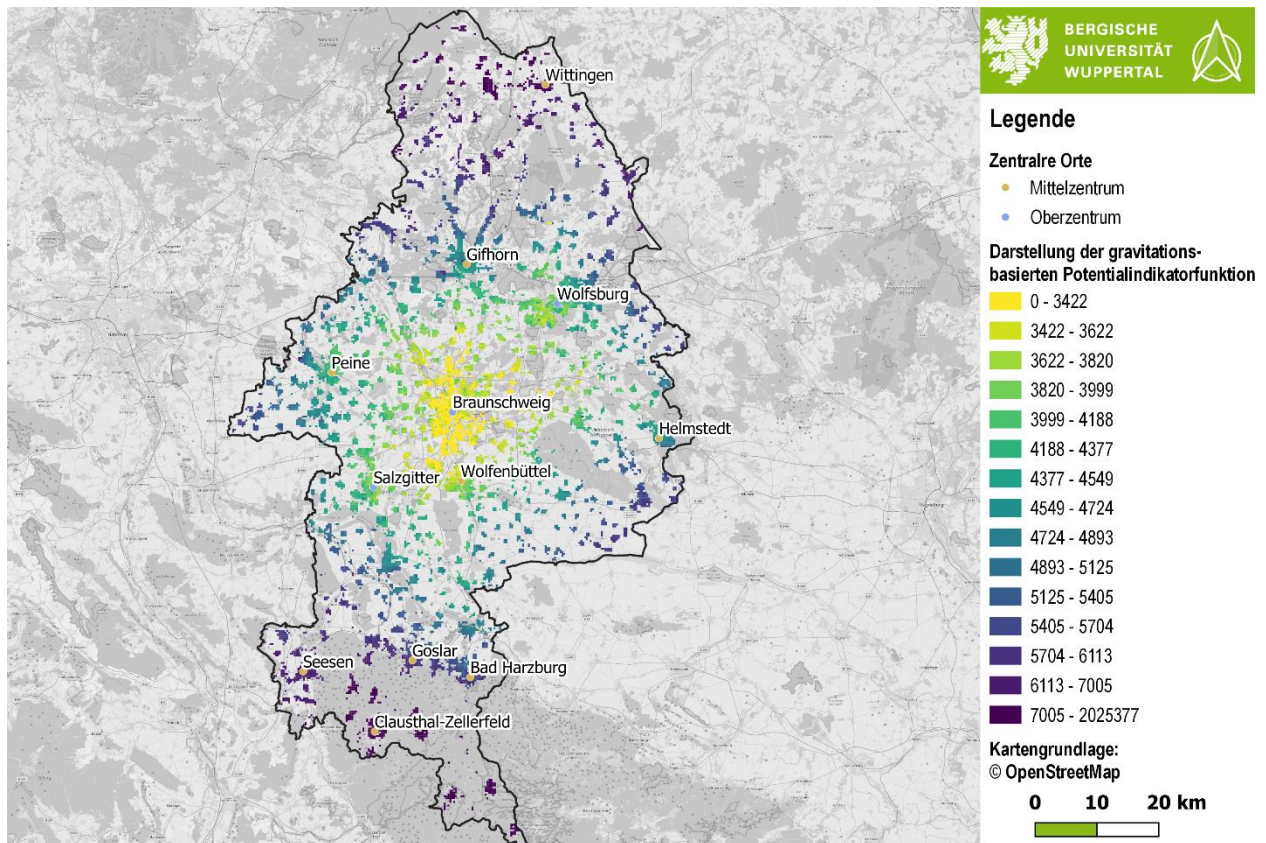


Abbildung 38 Darstellung der gravitationsbasierten Potentialindikatorfunktion für den mIV im Regionalverband Großraum Braunschweig, nach (Hesse et al. 2012)

Um Reisezeitvergleiche nach RIN 2008-Methodik durchzuführen, werden die Zugangs-, Parksuch- und Abgangszeiten zu jeder einzelnen umgelegten Relation hinzugefügt. Im ersten Schritt werden die Verbindungen in den beiden OZ Braunschweig und Halle verglichen. Die bereits durchgeführten Analysen zur Erreichbarkeit des ÖPNV in den beiden Städten zeigt, dass sie über eine hohe Netzqualität verfügen. Da es unter Umständen sein kann, dass nicht für alle Quell-Zielbeziehungen des ÖPNV Reisezeiten vorliegen, werden für diese Relationen das Quantil der Vergleichsgröße $t_{\text{ÖV}}/t_{\text{mIV}}$ gewählt, welches die schlechteste Qualitätsstufe (vgl. Abbildung 37) abbildet, um die Zielformulierung des VDV aufzugreifen.

Die RIN 2008 schlagen in Abhängigkeit der Gebietscharakteristik unterschiedliche Zugangs-, Parksuch- und Abgangszeiten vor. Da keine detaillierten Raumstrukturdaten vorliegen, werden die schärfsten Werte gewählt. Die Zugangs- und Abgangszeit wird jeweils mit 2,5 min abgebildet. Für die Parksuchverkehre wird eine Extrazeit von 4 min angegeben. (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2009)

Zunächst werden die Quantile der Verteilung verglichen, um Pauschalwerte für Relationen zu haben, die über keine Fahrten verfügen. Als Untersuchungsgröße wird die minimale Reisezeit jeder Luftlinienverbindung gewählt. Der Median des Reisezeitvergleichs $t_{\text{ÖV}}/t_{\text{mIV}}$ beträgt für die minimalen Reisezeiten 1,78. Dies entspricht Abbildung 37 folgend einer Qualitätsstufe von C. Vergleicht man hingegen alle Verbindungen einer Relation, so verschlechtert sich der Median zu 2,04. Aufschlussreich ist zudem ein Vergleich zwischen den 99 %-Quantilen für die minimalen Reisezeiten bzw. für alle Reisezeiten im Vergleich zum mIV: Für ersteres ergibt sich ein Wert von

rund 3,26 (Qualitätsstufe E), wohingegen für alle Verbindungen ein Wert von 4,41 (Qualitätsstufe F) folgt.

Für die Relationen, für die kein Verhältniswert ermittelt werden kann, wird ein Pauschalwert von 3,26 angesetzt. Da im Ergebnis ein Vergleichswert für jede bewohnte Gitterzelle mit einer Kantenlänge von 300 m vorliegt, wird ein Durchschnittswert je Quellzelle zu allen Zielzellen gebildet. Dies trifft für 37 Zellen zu, wobei zwei dieser Zellen nur jeweils über 2 ermittelte Reisezeiten zwischen den Luftlinienverbindungen verfügen. Nach der Bereinigung der fehlenden Reisezeiten liegt im Ergebnis ein ermitteltes durchschnittliches Reisezeitverhältnis zwischen allen bewohnten Zellen vor. Die räumliche Verteilung des Reisezeitverhältnisses für die Stadt Braunschweig kann Abbildung 39 entnommen werden. Die Analyse des Reisezeitvergleichs zeigt für Braunschweig, dass die überwiegende Anzahl der Relationen über ein gutes Verhältnis verfügen. Die These, dass der ÖPNV insbesondere in Großstädten konkurrenzfähig ist, kann für Braunschweig belegt werden.

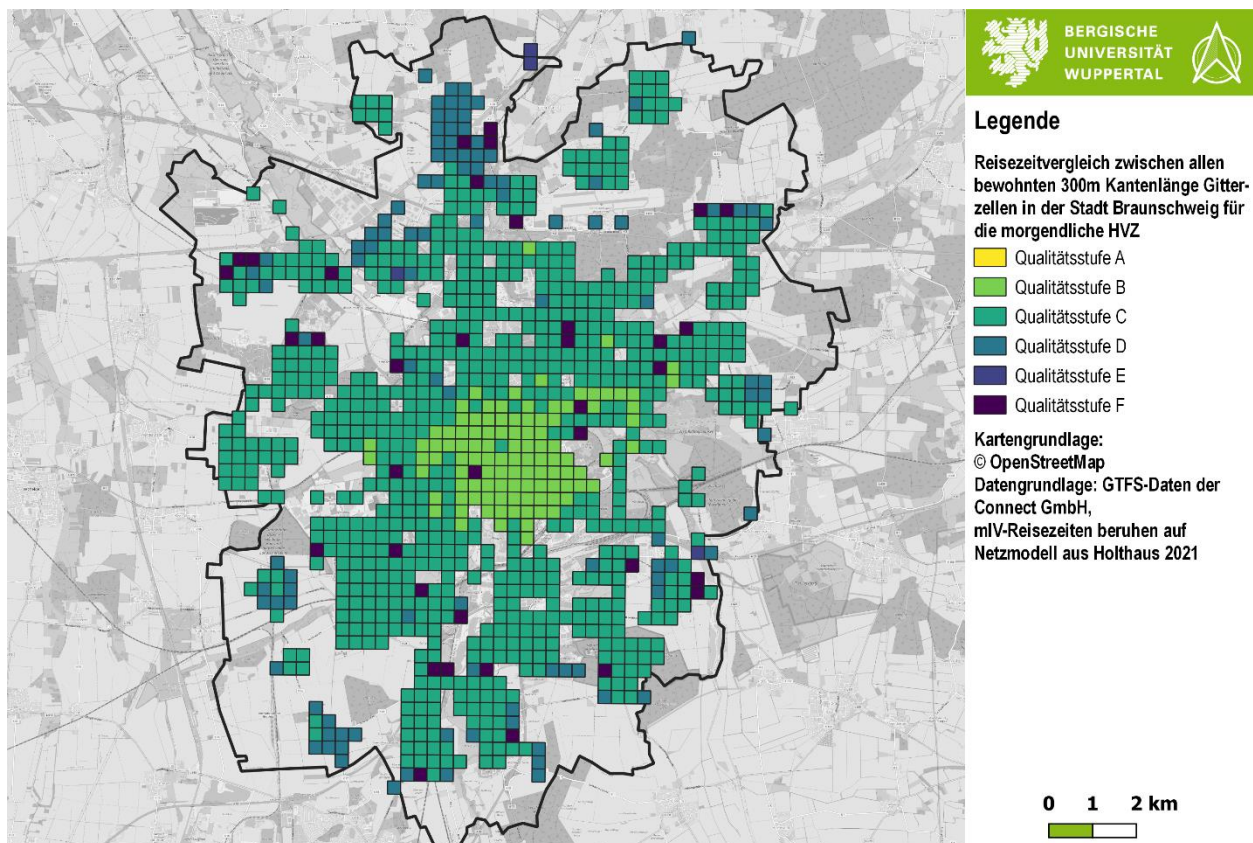


Abbildung 39 Räumliche Verteilung des Reisezeitverhältnisses zwischen allen bewohnten Gitterzellen in der Stadt Braunschweig

Die Reisezeitverhältnisse werden nachfolgend auch für die Median-Verbindungen der Relationen der VFS-II und III dargestellt.¹⁴ Eine Gegenüberstellung der Summenverteilungen kann aus Abbildung 40 entnommen werden. Die Summenverteilungen zeigen, dass die verbindungsbezogene Angebotsqualität des RVB besser im Vergleich zum MDV abschneidet. Die Mediane liegen für

¹⁴ Im Anhang finden sich die Reisezeitverhältnisse für die Gemeinden der beiden untersuchten Regionen

die Verbindungen beider Regionen bei rund 2,5. Werden die Kriterien zum Reisezeitverhältnis der VDV angewandt, so ergibt sich eine Qualitätsstufe zwischen D und E.

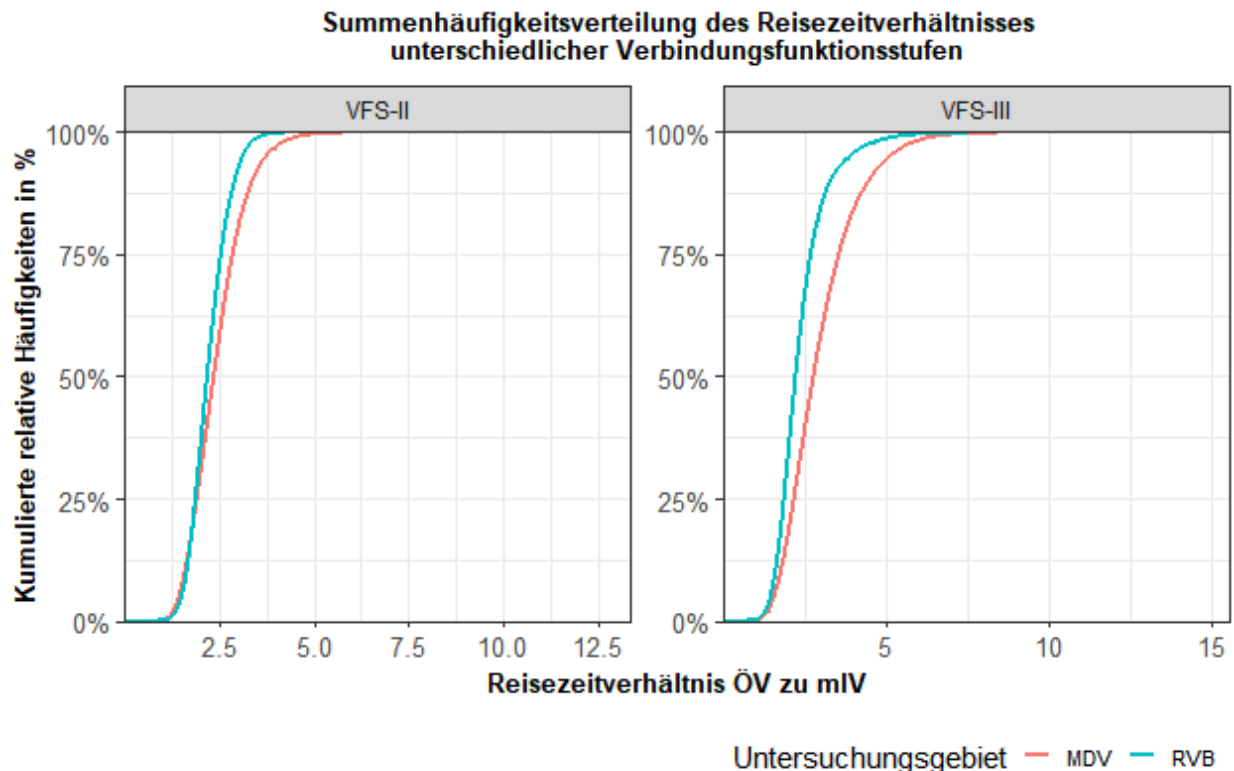
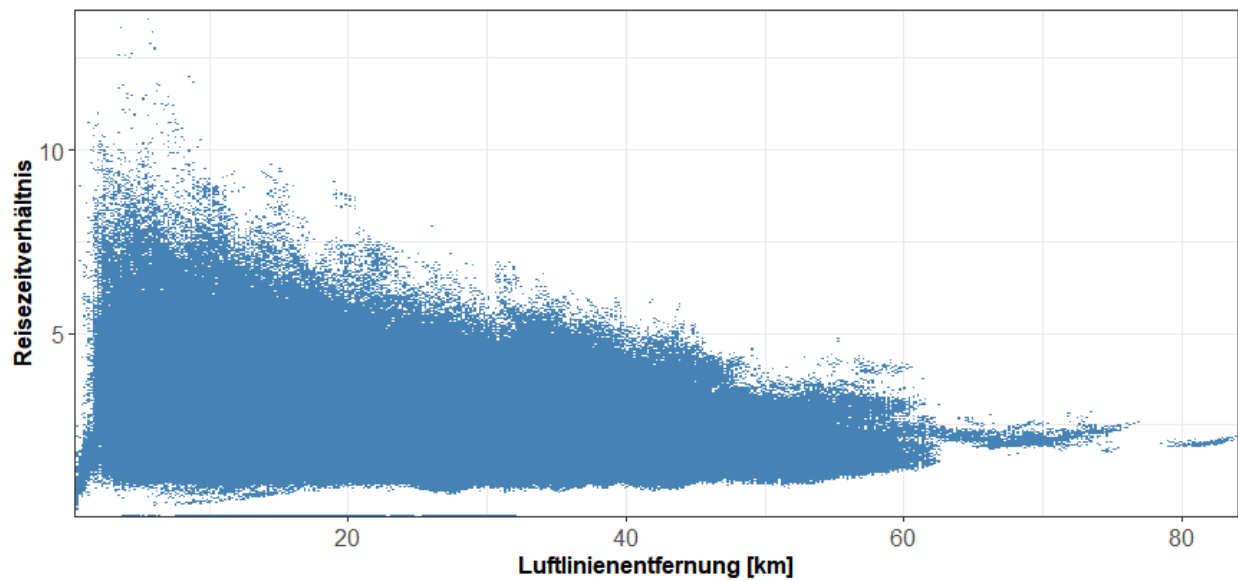


Abbildung 40 Summenhäufigkeitsverteilungen der Reisezeitverhältnisse der VFS II und III

Auf Grundlage der umfangreichen Datenbasis liegen für alle Verbindungen Reisezeitverhältnisse vor, die nach RIN 2008 auch als Wertepaar in Abhängigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten dargestellt werden können. Für diese Darstellung werden die minimalen Reisezeitverhältnisse je Relation gewählt. Da die Reisezeiten des mIV in der HVZ ermittelt werden, werden auch hier nur Relationen der VFS-II und III untersucht, die zwischen 8 und 10 Uhr gestartet sind.

Zur Analyse werden bereits die für die Schätzung der SAQ-Kurven ausgewählten Verbindungen herangezogen. Eine Darstellung der Wertebeziehungen zwischen dem Reisezeitverhältnis und der Luftliniengeschwindigkeit kann Abbildung 41 entnommen werden. Die Analyse der Reisezeitverhältnisse zeigt, dass der ÖV im ländlichen Raum nach aktueller Ausgestaltung des Angebots nicht konkurrenzfähig ist. Zudem wird ersichtlich, dass die Qualitätsstufen der verkehrsplanerischen Richtlinien nicht adäquat den ÖV im ländlichen Raum abbilden.

**Wertebeziehungen zwischen des Reisezeitverhältnisses und der Luftlinienentfernung
für die Verbindungen der VFS-II und III**



**Abbildung 41 Wertebeziehungen des Reisezeitverhältnisses und der Luftlinienentfernung
für die Verbindungen der VFS-II und III**

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Angebotsqualität des ÖPNV im ländlichen Raum. Zur Berechnung quantitativer Größen werden GTFS-Daten verwendet, die den Sollfahrplan eines ÖV-Systems beschreiben. Neben der GTFS-gestützten Berechnung von Kenngrößen wird ein Reisezeitmodell aufgebaut, um verbindungsbezogene Angebotsqualitäten der RIN 2008 kleinräumig in zwei Untersuchungsregionen zu berechnen. Als Untersuchungsräume werden die Regionen des RVB und des MDV gewählt.

Im ersten Schritt der Arbeit wird in die einschlägige Literatur zur Analyse des Angebots eines ÖV-Systems eingeführt. Dabei liegt der Fokus auf der Sichtung von Literatur, die GTFS-gestützt Methoden anwendet, um Kenngrößen der Angebots- bzw. Verbindungsqualität zu berechnen. Neben der Literatur werden grundlegende Konzepte und Vorstellungen der verkehrsplanerischen Erreichbarkeitsforschung skizziert. Die Betonung der verkehrsplanerischen Schwerpunktsetzung ist relevant, da die einschlägige Literatur im besten Sinne als interdisziplinär aufgefasst werden kann. Es zeigt sich, dass die widerstandsbasierte Modellierung von Erreichbarkeit nicht nur aus verkehrsplanerischer Sicht ein interessantes Maß bzw. Konzept ist, sondern dass auch andere Disziplinen diese Methoden anwenden.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Thesis liegt in der GTFS-gestützten Berechnung von Kenngrößen. Inhaltlich werden im ersten Teil die beiden ÖV-Systeme aus einer quantitativen Sichtweise analysiert und gezeigt, dass beide Regionen über eine ähnliche Ausgestaltung des Angebots verfügen. Als Analysegrößen werden die Erschließungs- und Bedienungsqualitäten angewandt. Bei ersterem kann gezeigt werden, dass durch die Nutzung des OTP eine tiefere Analyse der Erschließung mittels des multimodalen Umlegungsmodells einfach umsetzbar ist. Werden dann die untersuchten Haltestellen um den Gewichtungsfaktor erreichbarer Haltestellen erweitert, zeigt sich, welche Potentiale GTFS-Daten bei der Analyse der Angebotsqualität bieten. Für die beiden Regionen ergibt sich ein ähnliches Bild bei der Ausgestaltung des Fahrplanangebots.

Im nächsten Schritt sind die Bedienungsqualitäten des ÖV im RVB und MDV berechnet worden. Dort zeigt sich, dass das Angebot hinsichtlich der Abfahrten ähnlich für beide Regionen ist. Werden die Abfahrtszahlen jedoch siedlungsstrukturell aufbereitet, zeigt sich, dass die Bedienungsqualität in der Großstadt Leipzig im MDV besonders gut ist. Ein Vergleich auf Ebene der zentralen Orte hingegen lässt die Erkenntnis zu, dass die Bedienungsqualität im RVB besser ist.

Neben der Analyse der Angebotsqualität wird in der vorliegenden Arbeit die verbindungsbezogene Angebotsqualität untersucht. Mit den RIN 2008 liegt eine Richtlinie vor, die Methoden zur Ermittlung von verbindungsbezogenen Kenngrößen ermöglicht. Um die Anwendung der RIN 2008 in einfacher Form zu ermöglichen, wird ein teilautomatisiertes Verfahren zur Nachbarschaftsidentifizierung entwickelt. Im Anschluss liegen die Nachbarschaftsbeziehungen vor und die Luftlinienverbindungen können umgelegt werden. Die Analyse nach RIN 2008 zeigt, dass durch eine Anbindung einer Gemeinde über einen zentralen Knoten die tatsächlichen verbindungsbezogenen Kenngrößen nicht adäquat abgebildet werden. Dies wird zum Anlass genommen, um eine Verfahrensanpassung vorzunehmen. Die Luftlinienverbindungen werden nicht über die Nachbarschaftsgrade abgeleitet, sondern über vektorbasierte Isochronen, die über alle Haltestellen einer Gemeinde in vorgegebener Zeit die maximal erreichbare Fläche abbilden. Die so erzeugte Fläche wird dann mit den Gemeinden der Region verschnitten und alle geschnittenen Gemeinden werden in die Matrixbildung aufgenommen. Im Ergebnis liegen dann zwischen allen

Nachbarn Matrizen zwischen den bewohnten Gitterzellen auf 300m Kantenlänge vor, die mittels des OTP umgelegt werden.

Die beiden Methodenansätze zeigen unterschiedliche Ergebnisse. Die erzielten Qualitätsstufen werden nach aktueller RIN 2008-Methodik als besser ausgewiesen. Für die gitterzellenbasierte Analyse ergeben sich schlechtere Verbindungen. Dies kann auch an der Identifizierung der relevanten Verbindungen liegen. Die Untersuchung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität auf Grundlage eines Gitter hat zur Folge, dass eine sehr große Menge an umgelegten Verbindungen vorliegen. Um plausible Verbindungen in die Analyse aufzunehmen, müssen diese Relationen nach einem Kriterium ausgewiesen werden. Dazu werden in der Thesis unterschiedliche Ansätze diskutiert und sich dafür entschieden, dass nur Relationen aufgenommen werden, welche das Kriterium der maximalen Umsteigewartezeit einhalten. Es hat sich gezeigt, dass für eine große Menge an Verbindungen das Verhältnis aus Fahr- zu Reisezeit zulasten der Fahrzeit geht. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass dort Verbindungen aufgenommen werden, die über sehr hohe Zugangs-, Warte- und Abgangszeiten verfügen. Ein Blick in die fachwissenschaftliche Literatur macht deutlich, dass solche Verbindungen nicht wünschenswert sind. Um ein einfaches Kriterium zur Bestimmung zu haben, werden die Verbindungen also einbezogen, die die maximalen Umsteigewartezeiten je Raumtyp erfüllen.

Der so gewählte Ansatz erzielt plausible Ergebnisse. Mit den identifizierten Verbindungen können sodann neue SAQ-Kurven geschätzt werden. Die angewandte Methodik zur Schätzung der zugehörigen Regressionskurve wird beispielhaft auch für den mIV und für großräumige Verbindungen berechnet. Die Vergleiche lassen den Schluss zu, dass die geschätzten Kurven für die Luftliniendistanzen bis 50 km und für die städtischen ÖV-Relationen plausibel sind.

Neben der Analyse der Luftliniengeschwindigkeiten werden auch Reisezeitvergleiche zwischen den ÖV und den mIV berechnet. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse die vorherigen Erkenntnisse bestätigen, dass die Angebotsqualität im ländlichen Raum nicht in dem Maße zum mIV konkurrenzfähig ist.

Schlussendlich kann festgehalten werden, dass die aktuellen Methoden den ÖV im ländlichen Raum nicht adäquat abbilden.

7.1 Ausblick

Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass GTFS-Daten einen Beitrag zur Angebotsqualitätsmessung liefern können. Durch die kleinräumige gitterbasierte Analyse ist eine Datenbasis geschaffen, die die Auswertung weiterer Kenngrößen ermöglicht. Durch die vorliegende Arbeit sind erste Erkenntnisse zur Datenaufbereitung und zum Umgang mit großen relationsbezogenen ÖV-Daten geschaffen. Es konnte gezeigt werden, dass das Verhältnis zwischen der Fahr- zur Reisezeit ein wesentliches Kriterium zur Auswahl relevanter Verbindungen ist. Eine Berücksichtigung der Verhältnisgröße könnte auch für die RIN 2008-Analyse von Interesse sein.

Die Analyse auf Gitterebene zeigt jedoch, dass noch methodische Herausforderungen bestehen. Es müssen weitere Kriterien angewandt werden, um eine möglichst plausible und repräsentative Grundgesamtheit an Verbindungen zu identifizieren. Daneben müssen die auf dem Gitter vorliegenden Kenngrößen dahingehend ausgewertet werden, um neue Zielvorgaben für die richtlinienbasierte Verkehrsplanung nutzbar zu machen.

Eine Anpassung des Reisezeitmodells um die Berücksichtigung der SWZ ist anzustreben. Zudem könnte durch Anpassung der Skripte eine Erfassung relevanter Korridore ermöglicht werden. Die so zu erfassenden Korridore könnten theoretisch mit Echtzeitdaten hinsichtlich der Zuverlässigkeit untersucht werden.

Um Impulse für die Fortschreibung der RIN 2008 zu liefern, muss der hier entwickelte Ansatz um weitere Untersuchungen erweitert werden. Der hier vorgeschlagene Verfahrensansatz müsste in einer städtischen Region in NRW angewandt werden. Die hier geschätzten SAQ-Kurven können erste Hinweise liefern. Eine Plausibilisierung in anderen Regionen ist vonnöten. Ein Vergleich der ermittelten Luftliniengeschwindigkeiten nach RIN 2008 und hier vorgestellter Methodik könnte zudem aufschlussreich sein, um die Abweichungen auf Relationen zu untersuchen und zu schauen, welche räumlichen Gegebenheiten bei großen Abweichungen vorliegen.

8 Literaturverzeichnis

Ahlmeier, Florian; Wittowsky, Dirk (2018): Was brauchen wir in ländlichen Räumen? Erreichbarkeitsmodellierung als strategischer Ansatz der regionalen Standort- und Verkehrsplanung. In: *RuR* 76 (6), S. 531–550. DOI: 10.1007/s13147-018-0558-8.

Anton Marauli (2011): Nachfrageorientierte verkehrsmodellbasierende Planung im ÖV. In: 9. *Sommerakademie*, S. 73–85. Online verfügbar unter <https://graz.pure.elsevier.com/de/publications/nachfrageorientierte-verkehrsmodellbasierende-planung-im-%C3%B6v>.

Bast, Hannah; Brosi, Patrick (2018): Sparse map-matching in public transit networks with turn restrictions. In: Farnoush Banaei-Kashani und A. Special Interest Group on SpatialC.M. Information (Hg.): *Proceedings of the 26th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. SIGSPATIAL '18: 26th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. Seattle Washington, 06 11 2018 09 11 2018*. [Place of publication not identified]: ACM, S. 480–483.

Braunschweig, Regionalverband Großraum (2022): Regionalverband Großraum Braunschweig: Aufgaben. Regionalverband Großraum Braunschweig. Online verfügbar unter <https://www.regionalverband-braunschweig.de/ueber-uns/aufgaben/>, zuletzt aktualisiert am 20.06.2022, zuletzt geprüft am 20.06.2022.

Brosi, Patrick (2022): GitHub - patrickbr/gtfstidy: A tool for checking, sanitizing and minimizing GTFS feeds. Online verfügbar unter <https://github.com/patrickbr/gtfstidy>, zuletzt aktualisiert am 20.06.2022, zuletzt geprüft am 20.06.2022.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2020): Geographische Gitter für Deutschland. Geogitter. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.

Burgenlandkreis (2018): Nahverkehrsplan Burgenlandkreis. Hg. v. Burgenlandkreis. Burgenlandkreis.

Deiters, Jürgen (1996): Die Zentrale-Orte-Konzeption auf dem Prüfstand. Wiederbelebung eines klassischen Raumordnungsinstrumentes? In: *Informationen zur Raumentwicklung* (10), S. 631–646.

Fayyaz, S. Kiavash; Liu, Xiaoyue Cathy; Porter, Richard J. (2017): Dynamic transit accessibility and transit gap causality analysis. In: *Journal of Transport Geography* 59, S. 27–39. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2017.01.006.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung. RIN. Ausgabe 2008. Köln (FGSV R1 - Regelwerke, FGSV 121).

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2018): Hinweise zur Anwendung der RIN. W1. Ausgabe 2018. Köln: FGSV Verlag GmbH (FGSV, 121, 1).

Franzen, Nathalie; Kühne, Olaf; Hartz, Andrea; Zeck, Holger (2008): Herausforderung Vielfalt - ländliche Räume im Struktur- und Politikwandel. 1. Aufl.: Hannover : Akademie für Raumforschung und Landesplanung (E-paper der ARL). Online verfügbar unter http://shop.arl-net.de/media/direct/pdf/e-paper_der_arl_nr4.pdf<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0156-72103http://hdl.handle.net/10419/59893https://d-nb.info/991006364>.

Freistaat Thüringen. Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (o. J.): Historische Entwicklung der Verwaltungsstrukturen. Hg. v. Freistaat Thüringen. Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz. Freistaat Thüringen. Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz.

Friedrich, Markus: Wie viele? Wohin? Womit? Was können uns Verkehrsnachfragemodelle wirklich sagen? In: Tagungsbericht Heureka 11.

Friedrich, Markus (1994): Rechnergestütztes Entwurfsverfahren für den ÖPNV im ländlichen Raum. Technische Universität München, München. Online verfügbar unter https://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/1994_friedrich_1994_rechnergestuetzte_oev-angebotsplanung.pdf.

Gidam, M.; Kalasek, R.; Pühringer, F. (2020): GTFS in ÖV-Erreichbarkeitsanalysen. In: *AGIT: Journal fuer Angewandte Geoinformatik* (6aae3411377a4f03aedb3299eff47745). Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view/1754802>.

GTFS Transit Feed Specification (2022): Reference - General Transit Feed Specification. Online verfügbar unter <https://gtfs.org/schedule/reference/>, zuletzt aktualisiert am 26.05.2022, zuletzt geprüft am 03.06.2022.

Hanitzsch, Andreas (2015): Maximierung und Sicherung der Angebotsqualität im nachfragegesteuerten ÖPNV durch Analyse von Verkehrs- und Betriebsdaten. München: Lehrstuhl für Verkehrstechnik (Schriftenreihe / Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München).

Hartl, Maximilian (2020): Integrierte ÖV-Planung - Entwurf, Vergleich und Bewertung von planerischen und algorithmischen Lösungsverfahren. Unter Mitarbeit von Universität Stuttgart.

Hesse, Claudia; Bohne, Simon; Evangelios, Christos; Püschel, Ronny (2012): Erreichbarkeitsmessung: Theoretische Konzepte und empirische Anwendungen. Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr (3/2012), 08.12.2012. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/254459984_Erreichbarkeitsmessung_Theoretische_Konzepte_und_empirische_Anwendungen, zuletzt geprüft am 08.12.2021.

Holthaus, Tim (o.J.): Open Source gestützte Anwendung der Richtlinien für integrierte Netzgestaltung im ländlichen Raum. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fachzentrum Verkehr.

lablonovski, Guilherme (2020): The hitchhiker's guide to GTFS with python | by Guilherme M. lablonovski | Analytics Vidhya | Medium. Online verfügbar unter <https://medium.com/analytics-vidhya/the-hitchhikers-guide-to-gtfs-with-python-e9790090952a>, zuletzt aktualisiert am 03.06.2022, zuletzt geprüft am 03.06.2022.

Kaeoruean, Koragot; Phithakkitnukoon, Santi; Demissie, Merkebe Getachew; Kattan, Lina; Ratti, Carlo (2020): Analysis of demand–supply gaps in public transit systems based on census and GTFS data: a case study of Calgary, Canada. In: *Public Transp* 12 (3), S. 483–516. DOI: 10.1007/s12469-020-00252-y.

Kim, Junghwan; Lee, Bumsoo (2019): More than travel time: New accessibility index capturing the connectivity of transit services. In: *Journal of Transport Geography* 78, S. 8–18. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.05.008.

-
- Kirchhoff, Peter; Tsakarestos, Antonios (2007): Planung des ÖPNV in ländlichen Räumen. Ziele — Entwurf — Realisierung. Wiesbaden: Teubner (Springer eBook Collection Computer Science & Engineering).
- Klemmer, Jeanette (2016): Entwicklung einer Methodik zur funktionalen Gliederung von Netzen des Güterverkehrs und zur Bewertung der Angebotsqualität. Dissertation, Aachen.
- Kuntzsch, Christian (2015): Konzeption und Implementierung eines multimodalen Campusroutenplaners am Beispiel der Universität Potsdam - Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung von Open Source Software und freien Daten. Masterarbeit. Universität Potsdam, Potsdam.
- Küpper, Patrick (2016): Abgrenzung und Typisierung ländlicher Räume. Online verfügbar unter https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00023802.
- Kwan, Mei-Po (1998): Space-Time and Integral Measures of Individual Accessibility: A Comparative Analysis Using a Point-based Framework. In: *Geographical Analysis* 30 (3), S. 191–216. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1998.tb00396.x.
- Landkreis Nordsachsen (2010): Nahverkehrsplan. Hg. v. Landkreis Nordsachsen. Landkreis Nordsachsen.
- Leerkamp, Bert; Thiemermann, Andre; Schlott, Marian; Groß, Florian; Adenstedt, Frank; Bartlett, Ian (2021): AMZUG - Anschlussmobilität zukunftsfähig gestalten. Multimodales Gesamtkonzept. Planungsgesellschaft des Landkreises Grafschaft Bentheim.
- Leibniz-Institut für Länderkunde (2017): Konzept für das Modellvorhaben "langfristige Sicherung von Versorgung und Mobilität in ländlichen Räumen im Landkreis Leipzig. Hg. v. Leibniz-Institut für Länderkunde.
- Liao, Yuan; Gil, Jorge; Pereira, Rafael H. M.; Yeh, Sonia; Verendel, Vilhelm (2020): Disparities in travel times between car and transit: Spatiotemporal patterns in cities. In: *Sci Rep* 10 (1), S. 4056. DOI: 10.1038/s41598-020-61077-0.
- OpenTripPlanner (2020). Online verfügbar unter <http://dev.opentripplanner.org/apidoc/1.5.0/index.html>, zuletzt aktualisiert am 27.11.2020, zuletzt geprüft am 21.06.2022.
- Padgham, Mark (2021): GitHub - ATFutures/gtfs-router: Routing and analysis engine for GTFS (General Transit Feed Specification) data. Online verfügbar unter <https://github.com/ATFutures/gtfs-router>, zuletzt aktualisiert am 03.06.2022, zuletzt geprüft am 03.06.2022.
- Palonen, Tuomas; Viri, Riku (2019): Benchmarking public transport level-of-service using open data. In: *Transportation Research Procedia* 42, S. 100–108. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.12.010.
- Peter, Marcus (2021): Die Berechnung kleinräumiger und multimodaler Erreichbarkeiten auf regionaler Ebene. TUHH Universitätsbibliothek.
- Pütz, Thomas; Schönfelder, Stefan (2018): Verkehrsbild Deutschland. Angebotsqualitäten und Erreichbarkeiten im öffentlichen Verkehr. Unter Mitarbeit von Joscha Eberle. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (BBSR-Analysen KOMPAKT, 2018, 8). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-2018112207544235239099>.
- Regionale Planungsgemeinschaft Halle (2019): Regionaler Entwicklungsplan für die Planungsregion Halle. Sachlicher Teilplan. Zentrale Orte, Sicherung und Entwicklung der

Daseinsvorsorge sowie großflächiger Einzelhandel für die Planungsregion Halle. Hg. v. Regionale Planungsgemeinschaft Halle. Regionale Planungsgemeinschaft Halle.

Regionalverband Großraum Braunschweig (2008): Regionales Raumordnungsprogramm 2008. Regionalverband Großraum Braunschweig.

Regionalverband Großraum Braunschweig (2019): Zukunftskonzept für die Region Großraum Braunschweig. Strategisches Arbeitsprogramm für den Verband zur Weiterentwicklung der Region. Hg. v. Regionalverband Großraum Braunschweig.

Spangenberg, Martin (2008): Das System der Zentralen Orte in der aktuellen Landes- und Regionalplanung der Bundesländer, insbesondere vor dem Hintergrund des demografischen Wandels. Potsdam, 18.03.2008.

Sujit Kumar Sikder; Nico Ehrig; Dr. Hendrik Herold; Dr. Gotthard Meinel (2020): Analyse der ÖPNV-Versorgung mittels offener Fahrplandaten – Potenziale, Herausforderungen und Lösungsansätze. Online verfügbar unter [https://slub.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf\[id\]=https%3A%2F%2Fslub.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A77138%2Fmets](https://slub.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf[id]=https%3A%2F%2Fslub.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A77138%2Fmets).

Tsakarestos, Antonios (2014): Weiterentwicklung der Methodik zur Nahverkehrsplanung für ländliche Räume vor dem Hintergrund veränderter Randbedingungen. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2010. München: Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Techn. Univ (Schriftenreihe / Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München, H. 14).

Vallée, Dirk: Leitthema Verkehr. In: Neuaufstellung des Zentrale-Orte-Konzepts in Nordrhein-Westfalen, Bd. 17, S. 53–61. Online verfügbar unter https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/document/49810/1/ssoar-2016-vallee-Leitthema_Verkehr.pdf.

Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (2019): Verkehrserschließung, Verkehrsangebot und Netzqualität im ÖPNV. Ausgabe 01/19. Verband deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV) (VDV-Schrift, 4).

Werner, Uwe (2014): Über uns - Informationen zum MDV. In: *Mitteldeutscher Verkehrsverbund MDV*, 09.04.2014. Online verfügbar unter <https://www.mdv.de/ueber-uns/>, zuletzt geprüft am 20.06.2022.

Wessel, Nate; Farber, Steven (2019): On the accuracy of schedule-based GTFS for measuring accessibility. In: *JTLU* 12 (1). DOI: 10.5198/jtlu.2019.1502.

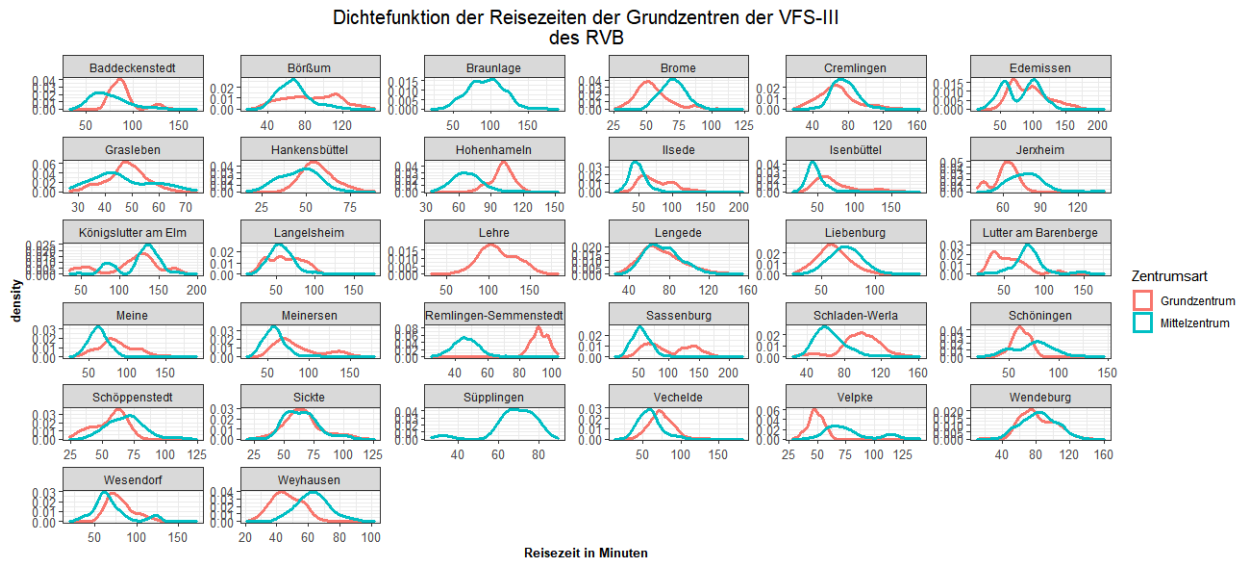
Young, Marcus (2019): OpenTripPlanner - creating and querying your own multimodal route planner. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/321110774_OpenTripPlanner_-_creating_and_querying_your_own_multi-modal_route_planner.

ZENSUS2011 - Bevölkerungs- und Wohnungszählung 2011 - Ergebnisse des Zensus 2011 zum Download - erweitert (2022). Online verfügbar unter <https://www.zensus2011.de/DE/Home/Aktuelles/DemografischeGrunddaten.html>, zuletzt aktualisiert am 20.06.2022, zuletzt geprüft am 20.06.2022.

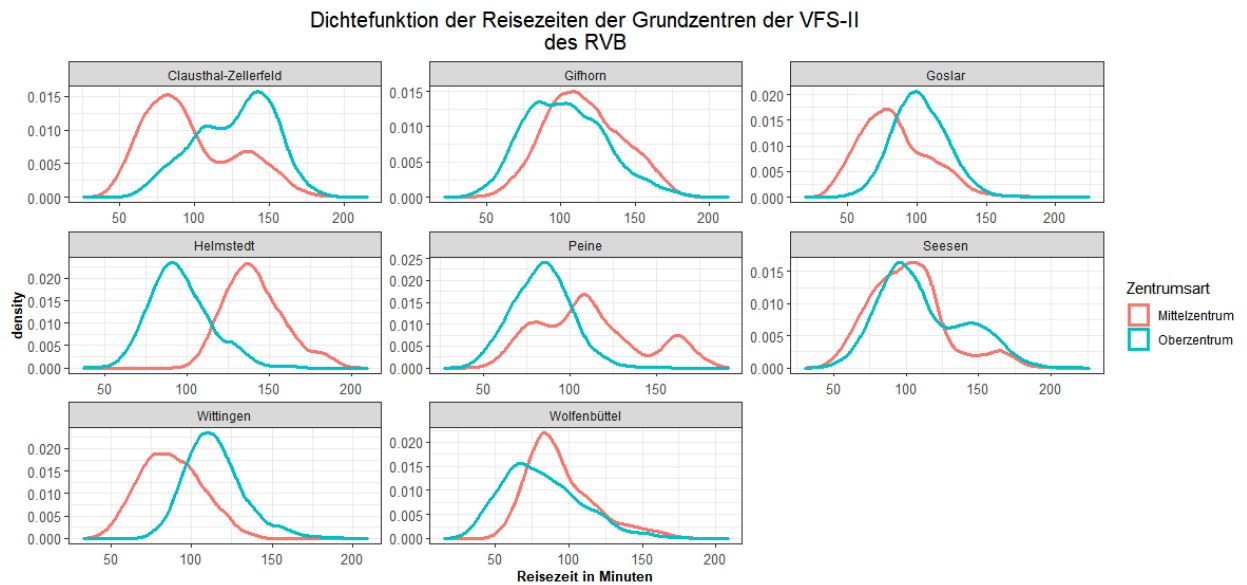
9 Anhang

9.1 Reisezeitverteilungen

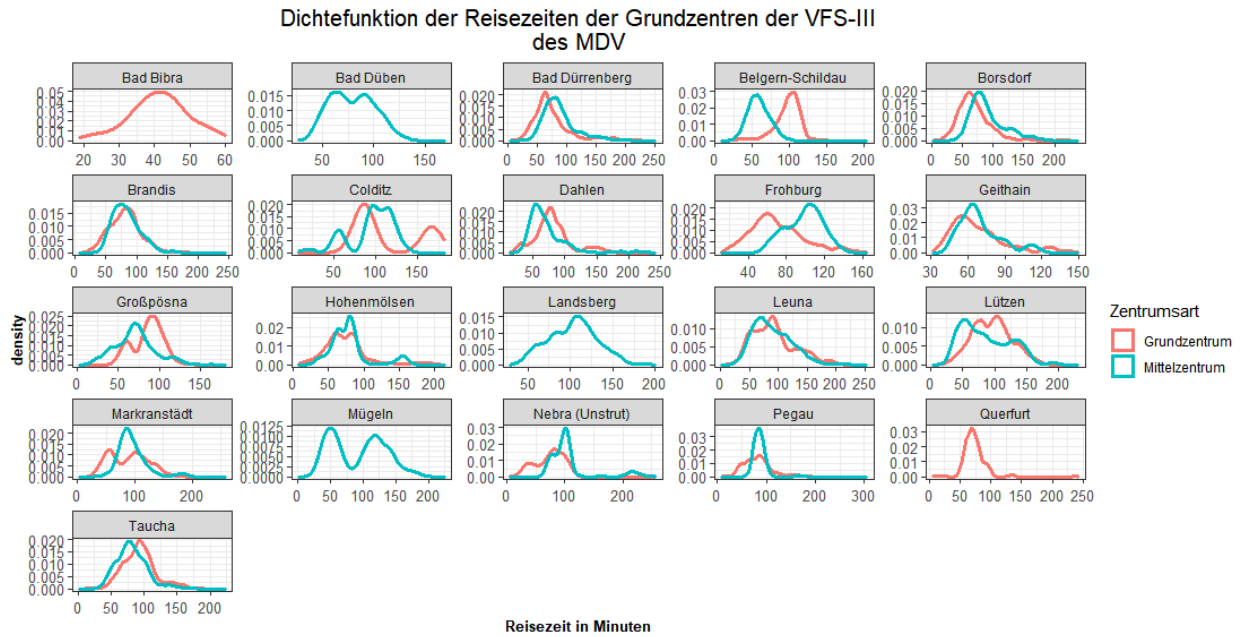
9.1.1 Reisezeitverteilungen der Grundzentren in der Region Großraum Braunschweig



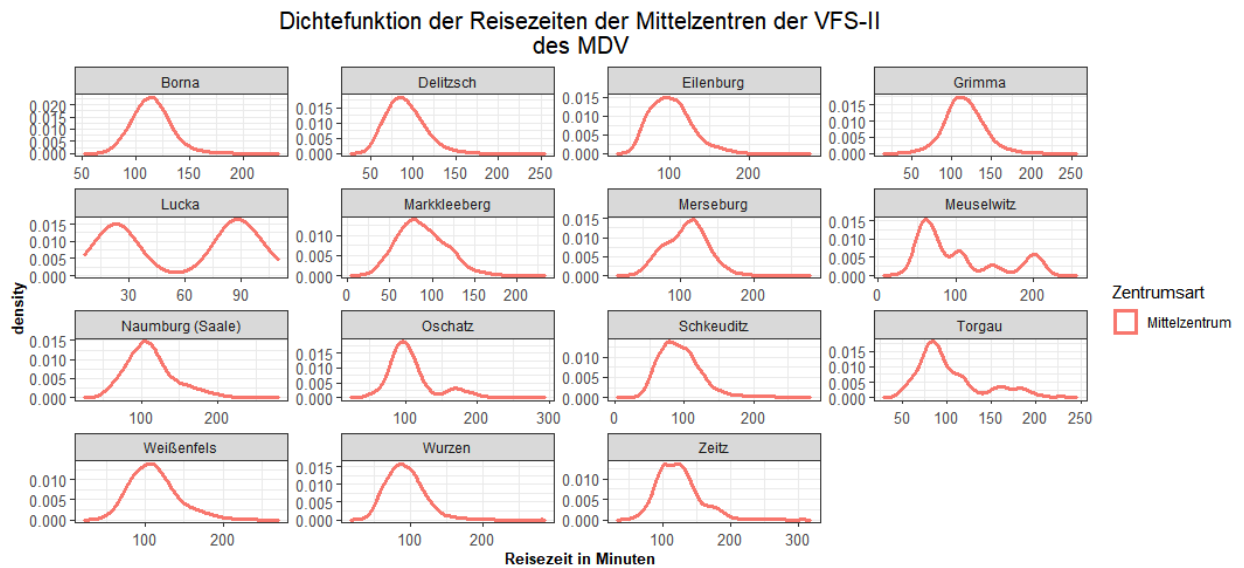
9.1.2 Reisezeitverteilungen der Grundzentren in der Region Großraum Braunschweig



9.1.3 Reisezeitverteilungen der Grundzentren des MDV

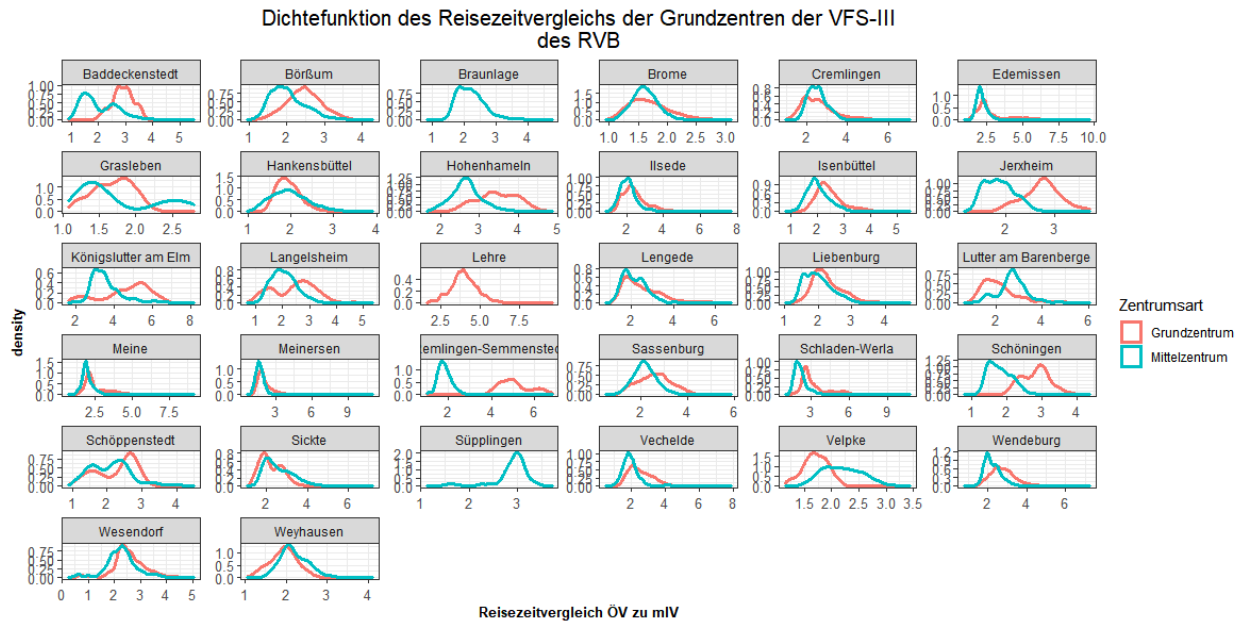


9.1.4 Reisezeitverteilungen der Mittelzentren des MDV

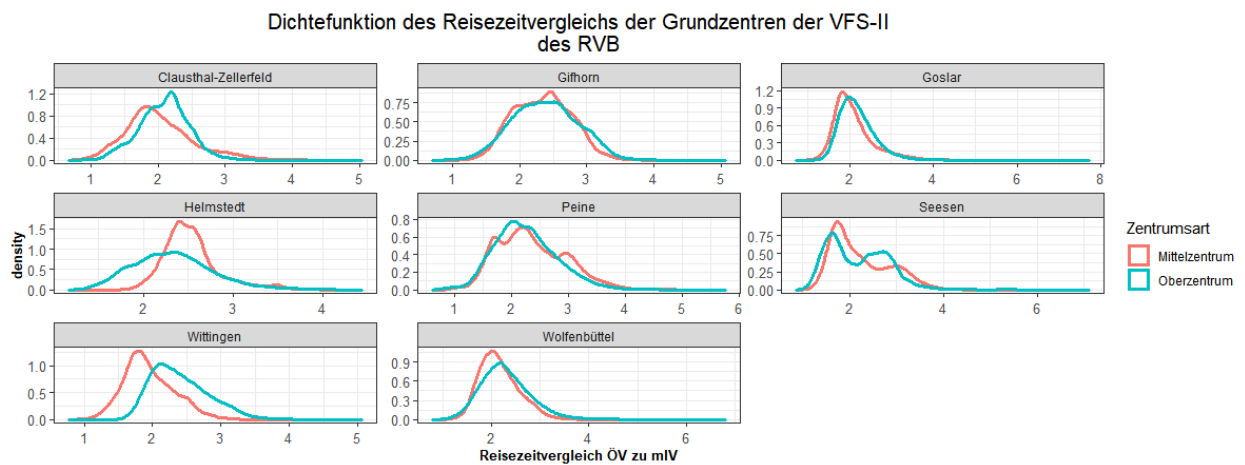


9.2 Dichtefunktionen des Reisezeitverhältnisses

9.2.1 Reisezeitverhältnis der Grundzentren in der Region Großraum Braunschweig

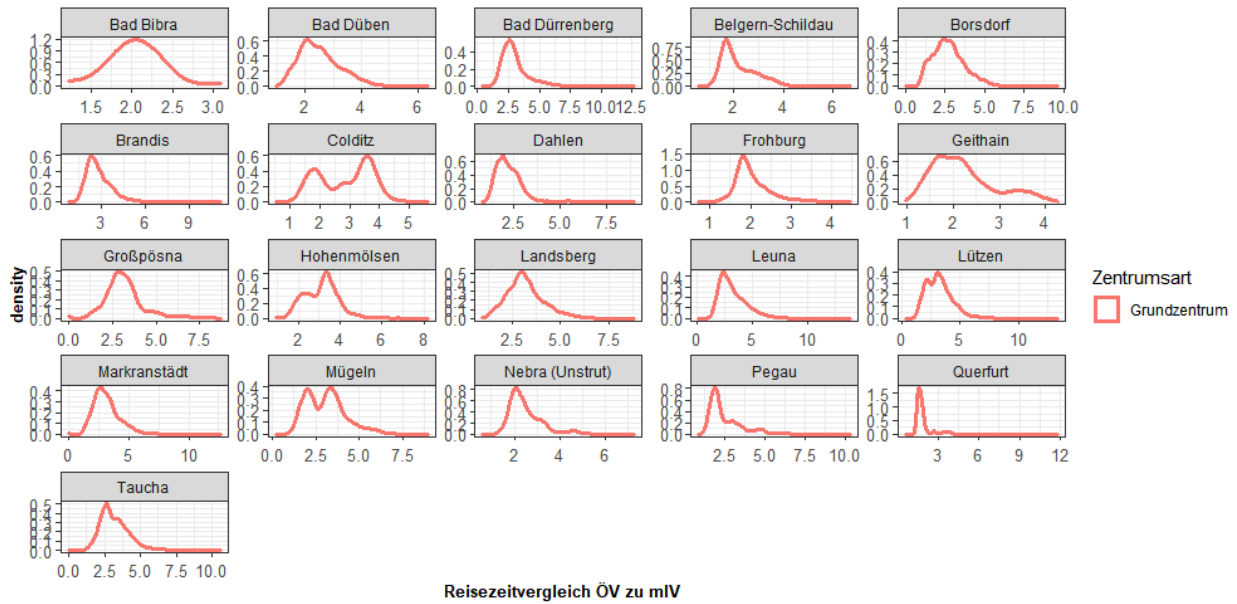


9.2.2 Reisezeitverhältnis der Mittelzentren in der Region Großraum Braunschweig



9.2.3 Dichtefunktionen der Reisezeitvergleiche der Grundzentren des MDV

Dichtefunktion des Reisezeitvergleichs der Grundzentren der VFS-III des MDV



9.2.4 Dichtefunktionen der Reisezeitvergleiche Mittelzentren des MDV

Dichtefunktion des Reisezeitvergleichs der Mittelzentren der VFS-II des MDV

