

Zusammenhang zwischen Einwohnerdichte, ÖV-Angebotsqualität und Modal-Split – Experimente mit einem Nachfragemodell

**Relationship between population density, public transport service
quality and modal split - experiments with a travel demand model**



Bearbeiter: Julian Zimmer

Studiengang: M.Sc. Verkehrsingenieurwesen

Betreuer: M. Sc. Alexander Migl

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

07. September 2022



vorgelegt an der

Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig verfasst habe und keine anderen Hilfestellungen oder Quellen als die angegebenen in Anspruch genommen habe.

Insbesondere habe ich keinen bezahlten Dienst mit der Anfertigung der gesamten Arbeit oder Teilen der Arbeit beauftragt.

Stuttgart, 07.09.2022

.....

(Julian Zimmer)

Diese Version (April 2024) enthält gegenüber der zur Bewertung vorgelegten Fassung geringfügige Korrekturen.

Bildnachweis Titelseite:

<https://unsplash.com/photos/Gup8MCvSsf0>; created by Max Böttinger

https://www.freepik.com/free-photo/residential-district-from-helicopter-barcelona_1632228.htm; created by bearfotos

Das linke Bild zeigt Ehningen in Baden-Württemberg, das rechte Bild Barcelona und L'Hospitalet de Llobregat in Katalonien

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluss der Einwohnerdichte auf den ÖV-Anteil und das ÖV-Angebot. Dazu wurden mögliche kausale Wirkungszusammenhänge formuliert und erfolgreich in einem makroskopischen Verkehrsnachfragemodell abgebildet. In einem fiktiven abstrakten Beispielnetz wurde bei konstanter Fläche die Einwohnerzahl variiert, um unterschiedliche Einwohnerdichten abzubilden. Darüber hinaus wurden der Einfluss von Änderungen des Tarifs und der Liniennetzstruktur betrachtet und die Entlastungswirkung des ÖV für die Stadt untersucht. Es zeigt sich, dass sich im Modell ein klarer Zusammenhang zwischen hoher Einwohnerdichte und hohem ÖV-Anteil sowie hoher ÖV-Angebotsqualität ergibt. Die Entlastungswirkung durch ein leistungsfähiges ÖV-Angebot ist durch Minderung der IV-Reisezeiten und Reduktion der IV-Verkehrsleistung (bei gleicher Einwohnerzahl) gegeben.

Abstract

This master's thesis deals with the influence that population density has on the share and supply of public transportation. Possible causal effects of the population density were formulated and successfully implemented in a macroscopic traffic demand model. To model the different population densities, the number of inhabitants was varied within a fictional, abstract example network with a fixed surface area. The influence of modifying the fare and line network structure was also taken into account. The model results show a clear connection between a high population density and a high public transportation share and supply. Additionally, the results showed that a well performing public transportation system in the fictional city (with the same number of inhabitants) manifested in the reduction of private transportation travel times and the total amount of private transportation kilometers traveled.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zusammenhang zwischen Dichte und Verkehrsmittelwahl	3
2.1	Definitionen von Dichte	3
2.2	Eigenschaften des motorisierten Individualverkehrs	4
2.3	Eigenschaften des öffentlichen Verkehrs	5
2.4	Eigenschaften des nichtmotorisierten Verkehrs	6
2.5	Wirkungszusammenhänge	6
2.6	Betrachtung realer Modal-Split-Daten	9
3	Verkehrsnachfragemodelle	16
3.1	Modelle der Verkehrsplanung	16
3.2	Unterschiedliche Modellansätze	17
3.3	Segmentierung der Nachfrage	18
3.4	Vier-Stufen-Algorithmus	19
3.5	VISEM-Wegekettensmodell	20
3.6	Entscheidungsmodelle	21
3.7	IV-Umlegung	22
3.8	ÖV-Umlegung	23
3.9	Rückkopplung	24
3.10	VISUM	24
4	Modellaufbau und Modelldokumentation	26
4.1	Grundannahmen	26
4.2	Ausgangspunkt	27
4.3	Personengruppen und Erzeugungsmodell	27
4.4	Netzmodell	28
4.4.1	Strukturdaten	28
4.4.2	Straßennetz	29
4.4.3	ÖV-Netz	31
4.5	Ziel- und Moduswahl	32
4.5.1	Anforderungen an die Moduswahl	32
4.5.2	Anforderungen an die Zielwahl	33
4.5.3	Wahlmodell	33
4.5.4	Startwartezeit im ÖV	34
4.5.5	Kostensätze	35
4.5.6	Bewertungsparameter	36
4.5.7	Modusspezifische Konstante	36
4.6	IV-Umlegungsverfahren	37
4.7	ÖV-Umlegungsverfahren	38
4.8	ÖV-Betreibermodell	39

4.9	Verfahrensablauf und Rückkopplung	39
4.10	Automatisierter Modellaufbau	39
4.11	Netzweite Aggregation von Kenngrößen	40
4.12	Modellweiterentwicklung	41
5	Untersuchung des Modellverhaltens ohne Angebotsanpassung	43
5.1	Idee der Untersuchung	43
5.2	Einführung in die Ergebnispräsentation	44
5.3	Betrachtungen des Modal Split	45
5.4	Betrachtungen der Reisezeit und der Reiseweite	48
5.5	Verkehrsleistung je Modus	54
5.6	Resümee	55
6	Untersuchung des Modellverhaltens mit Taktanpassung	56
6.1	Idee der Untersuchung	56
6.2	Betrachtungen des ÖV-Angebots und der Auslastung	58
6.3	Betrachtungen des Modal Split	60
6.4	Betrachtungen der Reisezeit	63
6.5	Vergleich mit realen Daten	65
6.6	Betrachtung zusätzlicher Varianten	67
6.7	Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit des ÖV	69
6.7.1	Kostendeckungsgrad	69
6.7.2	Betrachtung externer Nutzen	70
6.8	Betrachtung der IV-Verkehrsleistung	73
6.9	Resümee	73
7	Untersuchung des Modellverhaltens mit Takt- und Tarifierpassung	75
7.1	Idee der Untersuchung	75
7.2	Problematik der Pfadabhängigkeit	77
7.3	Betrachtungen des ÖV-Angebots und des Tarifs	78
7.4	Betrachtungen des Modal Split und der Auslastung	81
7.5	Betrachtungen des Kostendeckungsgrads	83
7.6	Betrachtung der IV-Verkehrsleistung	85
7.7	Untersuchung Tarifierpassung bei konstantem Fahrplanangebot	86
7.8	Resümee	88
8	Technische Umsetzung	90
8.1	Python	90
8.2	Die VISUM-COM-Schnittstelle	90
8.3	Modellzusammenbau	91
8.4	Variationsexperimente	91
8.4.1	Aufbau und Ablauf	91
8.4.2	Kontroll- und Auswerteskript	92
8.4.3	Modellanpassungsskripte	93
8.4.4	Relationsfiltermatrizen	95
8.5	Hilfsskripte	96
8.6	Datenauswertung	96

9	Fazit und Ausblick	97
	Literatur	101
A	Abkürzungsverzeichnis	103
B	Formelzeichenverzeichnis	105
C	Ergänzende Modelldokumentation	107
D	Aufteilung des Grundmodells auf Einzeldateien	110
E	Reale Modal-Split-Daten	112
F	Vergleich von Modellkonfigurationen	114

Abbildungsverzeichnis

2.1	Wirkungsdiagramme der Auswirkungen von hoher und geringer Dichte auf den ÖV-Anteil und das ÖV-Angebot	7
2.2	Einwohnerdichte deutscher Städte in Abhängigkeit der Einwohnerzahl . .	10
2.3	ÖV-Anteil deutscher Städte in Abhängigkeit von Einwohnerzahl und Einwohnerdichte	12
2.4	MIV-Anteil deutscher Städte in Abhängigkeit von Einwohnerzahl und Einwohnerdichte	12
2.5	Slow-Modes-Anteil deutscher Städte in Abhängigkeit von Einwohnerzahl und Einwohnerdichte	14
2.6	Modal-Split-Werte für deutsche Städte in Abhängigkeit des Studierendenanteils	15
3.1	Verkehrsrelevante Entscheidungen und ihre Zuordnung zu Modellen der Verkehrsplanung	17
3.2	BPR-Funktion und LOHSE-Funktion im Vergleich	23
4.1	Relative Tagesganglinie der Verkehrsnachfrage	28
4.2	Strukturdaten der Verkehrszellen im VISUM-Modell	29
4.3	Im VISUM-Modell hinterlegtes Straßennetz	30
4.4	Das verwendete ÖV-Liniennetz	31
4.5	Betrachtung der Startwartezeit bei Überlagerung von drei Linien	34
4.6	Untersuchung der Auswirkung von β auf Reiseweite und Modal Split . . .	37
4.7	Verfahrensablauf der separaten Zielwahl und des Standardverfahrens mit Rückkopplung und fixierter Zielwahl	42
5.1	Wirkungszusammenhänge des Einflusses der Dichte auf den ÖV-Anteil, wie sie in der Modelluntersuchung ohne Angebotsanpassung berücksichtigt werden	43
5.2	Veränderung der IV-Reisezeit und des Modal Split bei unterschiedlicher Einwohnerzahl/Einwohnerdichte und konstantem ÖV-Angebot	44
5.3	Vergleich des aufkommensbezogenen Modal Split für die unterschiedlichen Personengruppen und die beiden konstanten ÖV-Angebote	45
5.4	Vergleich des Modal Split auf den Relationen mit höchstem und niedrigstem ÖV-Anteil für die beiden konstanten ÖV-Angebote	46
5.5	Vergleich des aufkommensbezogenen und des leistungsbezogenen Modal Split bei konstantem ÖV-Angebot	47
5.6	Vergleich der nach potentieller und realisierter Nachfrage gewichteten mittleren IV-Reisezeit im Netz bei konstantem ÖV-Angebot mit 20'-Takt . .	49
5.7	Vergleich der nach potentieller und realisierter Nachfrage gewichteten mittleren Reisezeit und empfundenen Reisezeit im ÖV bei konstantem ÖV-Angebot mit 20'-Takt	50

5.8	Mittlere Reisezeit und Luftlinienreiseweite der Modi im Vergleich bei konstantem ÖV-Angebot im 20'-Takt	51
5.9	Vergleich der mittleren IV-Reisezeit für die beiden konstanten ÖV-Angebote und den Vergleichsfall gänzlich ohne ÖV	52
5.10	Durchschnittliche Luftliniengeschwindigkeit im IV und im ÖV für die beiden Modelle mit unterschiedlichem ÖV-Angebot	53
5.11	Verkehrsleistung je Modus insgesamt und je Einwohner für die beiden Experimente mit konstantem ÖV-Angebot	54
6.1	Prozessgraph des Berechnungsablaufs im Verkehrsmodell für die Untersuchung mit Taktanpassung	57
6.2	Wirkungszusammenhänge des Einflusses der Dichte auf ÖV-Anteil und ÖV-Angebot, wie sie in der Modelluntersuchung mit Taktanpassung berücksichtigt werden	58
6.3	Entwicklung des ÖV-Angebots auf den einzelnen Linien als Bedienungsfrequenzen und Bus-Fahrleistung im Gesamtnetz	59
6.4	„Angebotseffizienz“ der unterschiedlichen Linien im Verlauf des Experiments	60
6.5	ÖV-Anteil in der Untersuchung mit Taktanpassung im Vergleich mit den Untersuchungen mit konstantem ÖV-Angebot	61
6.6	Modal Split auf Gruppen von Relationen nach Direktverbindung je Linie	62
6.7	Modal Split auf Gruppen von umsteigefreien Relationen je Linie mit Angebot je Linien	63
6.8	Entwicklung der ÖV-Reisezeit gewichtet mit der potentiellen und mit der realisierten Nachfrage	64
6.9	Entwicklung der IV-Reisezeit in der Untersuchung mit Taktanpassung: Vergleich zwischen Gewichtung mit potentieller und realisierter Nachfrage und Vergleich mit Untersuchungen mit konstantem sowie ohne ÖV-Angebot	64
6.10	Einwohnerzahl-Einwohnerdichte-Zusammenhang der Modellstadt und Zusammenhang zwischen Einwohnerzahl und Modal Split aus den Modellergebnissen im Vergleich mit deutschen Städten	66
6.11	Zusammenhang zwischen Einwohnerdichte und Modal Split aus den Modellergebnissen im Vergleich mit deutschen Städten	66
6.12	Modifiziertes Liniennetz mit verlängerter Linie 3 und Entwicklung des Angebots für dieses Liniennetz in der Untersuchung mit Standardtarif	68
6.13	Entwicklung des Modal Split für unterschiedliche Varianten	68
6.14	Kosten und Erlöse des ÖV-Betriebs und Kostendeckungsgrad	70
6.15	Deckungsfehlbetrag des ÖV-Betriebs mit der bewerteten täglichen Reisezeitdifferenz und bewertete Reisezeitdifferenz zum Vergleichsfall ohne ÖV	71
6.16	Betriebskosten des kostenlosen ÖV im Modell und bewertete Reisezeitdifferenz zum Vergleichsfall ohne ÖV	72
6.17	IV-Verkehrsleistung je Einwohner im Verlauf der Untersuchungen mit Angebotsanpassung in der Standardvariante sowie mit kostenlosem ÖV	73
7.1	Prozessgraph des Berechnungsablaufs im Verkehrsmodell für die Untersuchung mit Takt- und Tarifanpassung	76

7.2	Wirkungszusammenhänge des Einflusses der Dichte auf ÖV-Anteil und ÖV-Angebot, wie sie in der Modelluntersuchung mit Takt- und Tarifierpassung berücksichtigt werden	77
7.3	Vergleich des Modellablaufs mit Behalten des jeweils letzten Preises als Startpreis und mit Zurücksetzen des Preises auf einen niedrigen Ausgangspreis	78
7.4	Verlauf der Fahrpreise für die Untersuchungen mit Tarifierpassung und im Vergleich zum Standardtarif	79
7.5	Vergleich der Entwicklung des ÖV-Angebots für die Untersuchung mit konstantem Tarif sowie mit Tarifierpassung	80
7.6	Vergleich des Modal Split aus den beiden Untersuchungen mit Takt- und Tarifierpassung mit der Untersuchung nur mit Taktanpassung	81
7.7	Vergleich des Verlaufs der „Angebotseffizienz“ zweier Linien im Experiment mit 95 % angestrebtem Kostendeckungsgrad und im Experiment mit konstantem Tarif	82
7.8	Vergleich des Kostendeckungsgrads für die beiden Untersuchungen mit Tarifierpassung und die Untersuchung mit konstantem Tarif	84
7.9	Entwicklung von Kosten und Erlöses des ÖV-Betriebs sowie des Kostendeckungsgrad für die Untersuchungen mit Tarifierpassung	85
7.10	IV-Verkehrsleistung je Einwohner für die Untersuchungen mit Takt- und Tarifierpassung sowie den Vergleichsfall mit konstantem Tarif	86
7.11	Entwicklung des Modal Split in den Untersuchungen mit konstantem Fahrplanangebot und Tarifierpassung sowie im Vergleichsfall ohne Tarifierpassung	87
7.12	Entwicklung der Fahrpreise und des Kostendeckungsgrad in den Untersuchungen mit konstantem Fahrplanangebot und Tarifierpassung sowie im Vergleichsfall ohne Tarifierpassung	88
8.1	Hierarchische Organisation der Berechnungen und Aufgabenteilung zwischen Python-Skripten, VISUM und interaktiver Jupyter-Umgebung	92
C.1	Visualisierung der Nachfrageströme zwischen den Verkehrszellen	109
F.1	Verlauf des ÖV-Anteil in der Modelluntersuchung mit Taktanpassung nach der alten Modellkonfiguration und Untersuchungen zu den vorgeschlagenen Modifikationen	115
F.2	Vergleich der Untersuchungen des aufkommensbezogenen Modal Split für die unterschiedlichen Personengruppen und die beiden konstanten ÖV-Angebote für die alte und neue Modellkonfiguration	116
F.3	Vergleich der nach potentieller und realisierter Nachfrage gewichteten mittleren Reisezeit im ÖV bei konstantem ÖV-Angebot in der alten und neuen Modellkonfiguration	117
F.4	Vergleich der Untersuchung zur mittleren Reisezeit der beiden Modi bei konstantem ÖV-Angebot für die beiden Modellkonfigurationen	118
F.5	Vergleich der Untersuchung zur mittleren Reiseweite der beiden Modi bei konstantem ÖV-Angebot für die beiden Modellkonfigurationen	119

F.6	Vergleich der Untersuchungen der mittleren IV-Reisezeit für die beiden konstanten ÖV-Angebote und den Vergleichsfall gänzlich ohne ÖV für die beiden Modellkonfigurationen	119
F.7	Vergleich des Modal Splits in den Untersuchungen mit und ohne Angebotsanpassung in der alten und neuen Modellkonfiguration	121
F.8	Vergleich der Entwicklung des ÖV-Angebots in der Untersuchung mit Taktanpassung in der alten und neuen Modellkonfiguration	121

Tabellenverzeichnis

4.1	Im Straßennetz verwendete Streckentypen	30
C.1	Relative Verteilungsgewichte für die Strukturgrößen Wohnen, Arbeit und Sonstiges auf die Verkehrszellen	107
C.2	Relative Tagesganglinien	108
C.3	Fahrplan der ersten Fahrten eines Tages je Linie und Richtung	108
D.1	Aufteilung des Grundmodells auf Einzeldateien	110
E.1	Basisdaten und Modal-Split-Daten zu 35 deutschen Städten	112
E.2	Korrelationskoeffizienten der Modal-Split-Werte mit potentiellen Erklär- größen sowie Korrelationen zwischen den potentiellen Erklärgrößen . . .	113
E.3	Parameter aller gezeigten Regressionsfunktionen	113
F.1	Änderungen zwischen den verglichenen Modellkonfigurationen	116

1 Einleitung

Im Rahmen der angestrebten *Verkehrswende* soll eine Verlagerung weg vom Pkw-Verkehr hin zu umweltfreundlicheren Verkehrsmitteln erfolgen. Daher ist es für die Verkehrsplanung essentiell zu wissen, wovon die Nutzung unterschiedlicher Verkehrsmittel begünstigt wird und in welchen Situationen welche Verkehrsmittel eine *effiziente* Art der Fortbewegung darstellen.

Es bedarf keiner Mühe zu erkennen, dass beispielsweise der öffentliche Verkehr in Großstädten eine wesentliche Bedeutung hat, während er in ländlichen Räumen so gut wie keine Rolle spielt. Dies legt den Schluss nahe, dass die Bevölkerungsdichte einen wesentlichen Einfluss auf das Funktionieren des Konzepts ‚öffentlicher Verkehr‘ hat. Die niedrigen Bevölkerungsdichten im ländlichen Raum scheinen hingegen die Nutzung des Pkw zu begünstigen.

Die Auswirkungen des Pkw-Verkehrs in Form von Staus, Lärm, Abgasen und zerschneidender Infrastrukturen treten jedoch besonders in städtischen Räumen hervor. Dies zeigt nicht nur, dass auch in verdichteten Räumen die Nutzung des Pkws eine große Rolle spielt, sondern auch dass gerade hier die sorgfältige Betrachtung notwendig ist, welche Verkehrsmittel durch die örtlichen Gegebenheiten begünstigt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, den Zusammenhang zwischen der Einwohnerdichte und der Nutzung des öffentlichen Verkehrs eingehender zu untersuchen und dabei kausale Wirkungszusammenhänge zu betrachten. Zu dieser Untersuchung soll die Methodik der *makroskopischen Verkehrsnachfragemodellierung* verwendet werden.

Darüber hinaus soll untersucht werden, welchen Beitrag der öffentliche Verkehr zur Entlastung der Städte vom Pkw-Verkehr leistet und durch welche Eigenschaften des Angebots diese Entlastungswirkung besonders unterstützt werden kann.

Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 führt in den Begriff der Dichte und in die Eigenschaften der Verkehrsmittel ein. Hier erfolgt auch die Diskussion der Wirkungszusammenhänge und eine Untersuchung der *Korrelation* zwischen Stadtdichte und dem Anteil des öffentlichen Verkehrs. Kapitel 3 führt in die Thematik der Verkehrsnachfragemodelle ein, woraufhin in Kapitel 4 das

verwendete Nachfragemodell vorgestellt wird.

In den Kapiteln 5 bis 7 werden die durchgeführten Modelluntersuchungen und ihre Ergebnisse vorgestellt. Dabei werden in den Kapiteln 6 und 7 gelegentlich Vergleiche zu den vorangegangenen Untersuchungen gezogen. Jedes dieser Kapitel beginnt mit der Vorstellung der Idee der entsprechenden Untersuchung und schließt mit einem kleinen Resümee. Kapitel 8 geht auf technische Details der Experimentdurchführung ein. Da hierfür auf die Ideen zu allen Untersuchungen Bezug genommen werden muss, werden diese erst am Ende der Arbeit vorgestellt.

2 Zusammenhang zwischen Dichte und Verkehrsmittelwahl

2.1 Definitionen von Dichte

Die **Einwohnerdichte** oder **Bevölkerungsdichte** bezeichnet die mittlere Anzahl an Einwohnern pro Fläche für ein bestimmtes Gebiet. Dazu wird die Einwohnerzahl durch die Gesamtfläche des Gebiets geteilt [1]. Üblicherweise werden Gebietskörperschaften (z.B. Bundesländer, Städte und Gemeinden) oder sonstige administrative Einheiten (z.B. Stadtbezirke) als Gebiete herangezogen und die Fläche durch deren administrative Grenzen bestimmt. Diese Größe trifft keine Aussagen über die interne Verteilung der Einwohner auf der Fläche. Problematisch ist insbesondere, dass die beabsichtigte Aussage durch große Wald-, Landwirtschafts- oder Wasserflächen (oder deren Fehlen) auf dem betrachteten Gebiet (insbesondere bei Städten) verfälscht werden kann, und die Vergleichbarkeit dadurch schwierig wird.

Demgegenüber beschreibt die **Besiedelungsdichte** oder **Siedlungsdichte** die Einwohnerzahl geteilt durch die *Siedlungs- und Verkehrsfläche* in einem Gebiet [1]. Diese Kenngröße ist deutlich aussagekräftiger, jedoch schwieriger zu ermitteln und deshalb in öffentlichen Statistiken häufig nicht verfügbar. Deshalb wird auch in dieser Arbeit die Einwohnerdichte verwendet und von der Einwohnerdichte gesprochen, auch wenn manche Effekte eher von der Besiedelungsdichte abhängen.

Auch für andere Größen lassen sich durch Bezug auf die Fläche Dichten ermitteln, beispielsweise die *Arbeitsplatzdichte*. Auch für Elemente des Verkehrsnetzes lassen sich entsprechend Dichten bestimmen, zum Beispiel die *Haltestellendichte* oder *Netzdichte*. Es ist hierbei ebenfalls stets darauf zu achten, ob die Gesamtfläche oder die Siedlungs- und Verkehrsfläche als Grundlage dient.

In der Verkehrsplanung wird gelegentlich von der **Zieldichte** gesprochen. Damit gemeint ist die Anzahl von Aktivitätenorten (für Aktivitäten wie Arbeit, Ausbildung, Einkauf, Erledigung und Freizeit) oder die Summe der entsprechenden Zielpotentiale je Flächeneinheit.

2.2 Eigenschaften des motorisierten Individualverkehrs

Der *motorisierte Individualverkehr* (MIV) bezeichnet den Verkehr mit privaten motorisierten Fahrzeugen auf öffentlicher Infrastruktur, im Personenverkehr insbesondere mit Pkw. Der MIV hat auf der Nutzerseite zahlreiche Vorteile und erscheint dadurch in den meisten Fällen als die praktischste und geeignetste Fortbewegungsform. Somit ist der Pkw in den meisten entwickelten Ländern zum dominierenden Verkehrsmittel geworden [2].

So bietet der MIV in der Regel schnelle, umsteigefreie Tür-zu-Tür-Verbindungen und eine freie Abfahrtszeitwahl. Durch die im allgemeinen hohe Reisegeschwindigkeit bietet der MIV einen großen Aktionsradius [3]. Das Verkehrsmittel Pkw ist komfortabel und bequem und ermöglicht den unkomplizierten Transport von Gegenständen. Da meist ein eigener Pkw verwendet wird ist das Verkehrsmittel auch vertraut und erlaubt auch die Lagerung bzw. das ständige Mitführen von Gegenständen. Außerdem bietet der Pkw-Verkehr einen guten Schutz vor Witterung und eine hohe subjektive und zumindest im Bezug auf Kriminalität und Belästigung auch objektive Sicherheit.

Der Pkw-Verkehr hat auch zahlreiche Nachteile, die jedoch üblicherweise nicht beim Nutzer, sondern bei Dritten wirksam werden. Diese *externen Kosten* sind im MIV besonders hoch. Darunter fallen die Lärmbelästigung und die Beeinträchtigung der Luftqualität, ein hoher Energiebedarf und damit verbundene Treibhausgasemission sowie Unfälle. Ein weiterer Nachteil ist der hohe spezifische Flächenbedarf des MIV, und zwar sowohl im fließenden als auch im ruhenden Verkehr [3]. Dies kann in verdichteten Räumen problematisch sein. Der Pkw als Verkehrsmittel gilt deshalb als „massiv unterbegeistert“ [2]: die Nutzerpreise bilden die gesellschaftlichen Kosten nicht ab und verleiten zu häufiger Nutzung.

Hinzu kommt, dass die meisten Haushalte einen Pkw „sowieso“ vorhalten und die damit verbundenen Kosten (Anschaffung und Wertverlust, Steuern, Versicherung, Reparaturen) nicht mit den einzelnen damit durchgeführten Wegen in Verbindung bringen. Als sichtbare Kosten bleiben somit nur noch die Spritkosten, Parkkosten und in einigen Fällen Straßenbenutzungsgebühren übrig.

Genährt durch den allgemeinen Wohlstandszuwachs haben sich der Pkw-Verkehr und die *Suburbanisierung* in den vergangenen Jahrzehnten gegenseitig begünstigt und verstärkt [2]. Durch die Suburbanisierung entstehen große Wohngebiete mit niedriger Dichte und MIV-affiner Gestaltung im Umfeld der großen Städte, die Konzentration des Verkehrs und damit die Konzentration der negativen Umweltwirkungen erfolgt jedoch in den Städten.

(Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der motorisierte Individualverkehr mit Pkw ge-

legentlich vereinfachend auch nur als Individualverkehr (IV) bezeichnet, da dieser in den späteren Modellexperimenten die einzige betrachtete Form des Individualverkehr darstellt.)

2.3 Eigenschaften des öffentlichen Verkehrs

Unter *öffentlichem Verkehr* (ÖV) versteht man die gleichzeitige Beförderung mehrerer Personen mit unterschiedlichen Fahrtwünschen in einem Verkehrsmittel, es handelt sich dabei also um *kollektive Verkehrsmittel*. Das Verkehrsangebot wird dabei in der Regel in Form von Linien und Fahrplänen im Vorhinein bekannt gegeben. Es liegt in der Natur der Sache, dass dabei nicht alle Fahrtwünsche als Direktverbindung mit einem Fahrzeug angeboten werden, sondern für einige Fahrgäste die Notwendigkeit besteht, umzusteigen. Auch können nicht alle gewünschten genauen Start- und Zielorte unmittelbar angefahren werden, sondern die Fahrgäste müssen sich zu Zugangspunkten in Form von Haltestellen begeben. Auch in der zeitlichen Nutzbarkeit ist der öffentliche Verkehr mit Einschränkungen verbunden, zum einen durch die Bedienungshäufigkeiten (Takte) auf den jeweiligen Linien, zum anderen durch Tageszeiten (spätabends und nachts) in denen keine Fahrten angeboten werden oder das Angebot eingeschränkt wird. Öffentlicher Verkehr existiert als Fern- und Regionalverkehr zwischen Städten, sowie als *Öffentlicher Personennahverkehr* (ÖPNV) innerhalb einer Stadt bzw. zwischen einer Stadt und ihrem direkten Umland. In dieser Arbeit wird nur städtischer Verkehr betrachtet, und damit im Folgenden mit ÖV stets der ÖPNV bezeichnet.

Der öffentliche Verkehr und die Gestaltung des ÖV-Angebots sind generell geprägt von zahlreichen Zielkonflikten. Ein klassisches Beispiel ist der Zielkonflikt der guten Erschließung entlang eines ÖV-Korridors mit möglichst vielen Haltestellen und der möglichst hohen Beförderungsgeschwindigkeit durch wenige Halte.

Der öffentliche Verkehr dient mehreren Zwecken, die sich laut [4] zu zwei Gruppen von Zielen zusammenfassen lassen, zwischen denen ebenfalls ein Zielkonflikt besteht. Einerseits ist dies die Maximierung der *Abdeckung*, d.h. möglichst viele Einwohner und Aktivitätenorte an das ÖV-Netz anzuschließen. Dies entspricht dem Grundsatz der *Da-seinsvorsorge* und soll Mobilität für Menschen ermöglichen, die aus unterschiedlichen Gründen nicht den MIV nutzen können. Andererseits ist es die Maximierung der Nutzerzahlen bzw. der Verkehrsleistung, was impliziert dass auf Nachfragestarken Relationen ein möglichst attraktives Angebot geschaffen werden muss, um die Personen tatsächlich zur Nutzung des ÖV zu bewegen. Dies entspricht dem Grundsatz der *Verlagerung* und verfolgt Ziele wie die Minderungen der Gesamt-Emissionen des Verkehrs oder die

Entlastung der MIV-Infrastruktur sowie eine Maximierung der Fahrgeldeinnahmen. Umso niedriger die Siedlungsdichte ist, umso schwieriger wird auch die Vereinbarkeit der beiden Zielstellungen.

Der spezifische Flächenbedarf pro Verkehrsteilnehmer ist verglichen mit dem MIV gering, und zwar für alle Verkehrsmittel des ÖPNV [3]. Dies bedeutet auch, dass bei gegebener Flächenverfügbarkeit für Verkehrsinfrastruktur der öffentliche Verkehr eine besonders hohe Leistungsfähigkeit aufweist.

2.4 Eigenschaften des nichtmotorisierten Verkehrs

Der nichtmotorisierte Verkehr besteht im Wesentlichen aus dem Radverkehr und dem Zu Fuß gehen. Für diese Zusammenfassung existieren zahlreiche weitere Bezeichnungen, unter anderem *selbstaktiver Verkehr*, *Langsamverkehr*, *active modes* und *slow modes*. Als einzige Verkehrsform sorgt der unmotorisierte Verkehr nicht für umweltschädliche Emissionen und verbraucht keine technisch bereitgestellte Energie. Auch verursacht er im Allgemeinen keinen Lärm. Der spezifische Flächenbedarf je Verkehrsteilnehmer ist gering [3].

Die erreichten Höchstgeschwindigkeiten und die Reichweite sind im nichtmotorisierten Verkehr vergleichsweise gering. Aufgrund der eigenen Anstrengung reagiert der nichtmotorisierte Verkehr deutlich stärker auf den Widerstand der Entfernung als andere Verkehrsmittel. Auch auf die Topografie und die Aufenthaltsqualität entlang des Weges sind die Verkehrsteilnehmer hier empfindlich, ebenso wie für die Witterung. Die Bereitschaft zur Nutzung dieser Verkehrsmittel hängt also stark von der natürlichen und der gebauten Umwelt ab. Die Aufenthaltsqualität wird von Verkehrslärm und Abgasen, aber auch von Eintönigkeit [5], Verschmutzung und baulicher Tristesse beeinträchtigt.

Im Übrigen fungiert der nichtmotorisierte Verkehr auch als notwendiger Zubringer zu den Haltestellen des öffentlichen Verkehrs. Somit hängt auch die Bereitschaft zur Nutzung des ÖV von der Topografie und der Aufenthaltsqualität auf den notwendigen Fußwegen ab.

2.5 Wirkungszusammenhänge

Im Folgenden werden Überlegungen zu kausalen Wirkungszusammenhängen vorgestellt, durch die eine hohe Dichte zu einem hohen ÖV-Angebotsniveau und einer hohen ÖV-Nutzungshäufigkeit führt. Diese sind im Diagramm in Abbildung 2.1a visualisiert.

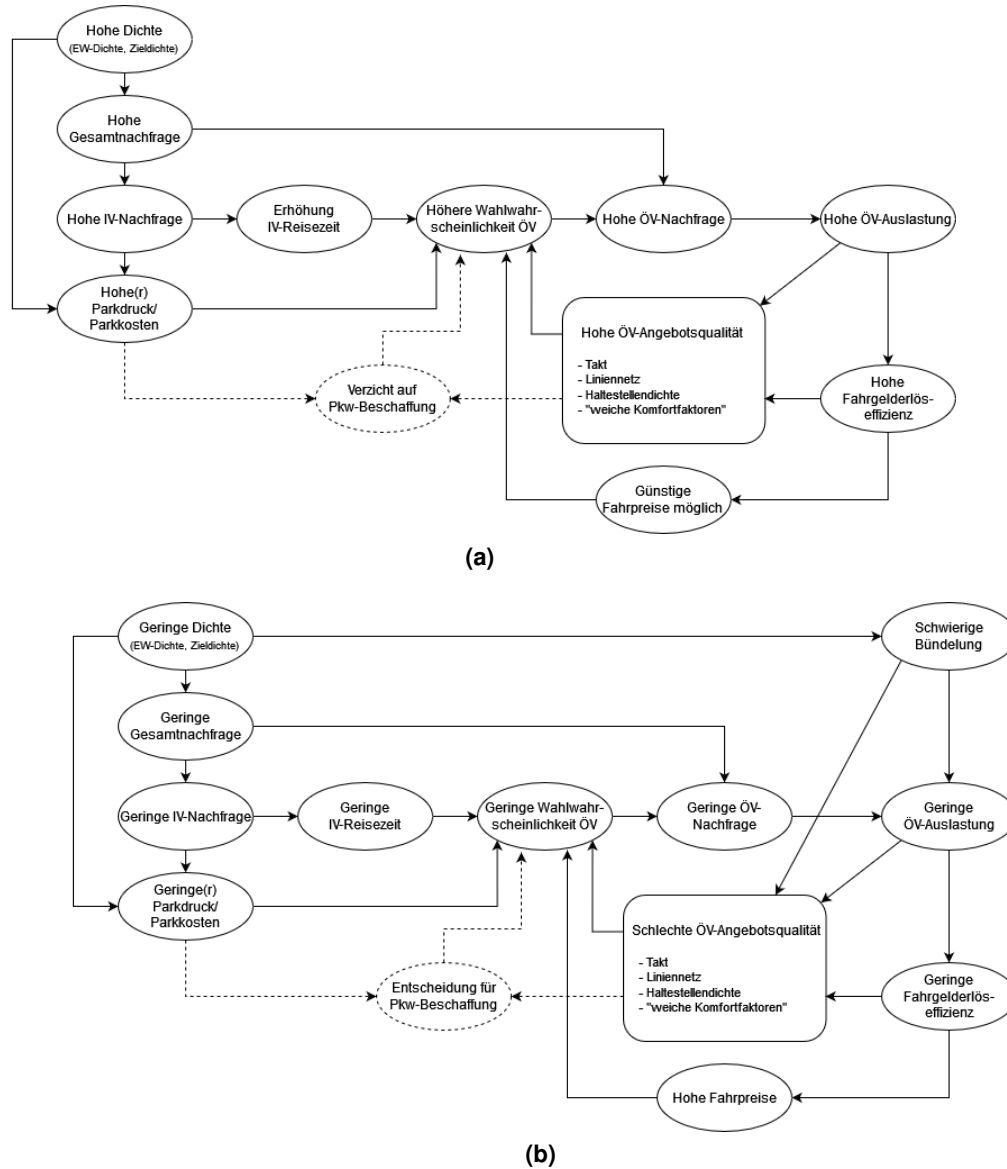


Abbildung 2.1: Wirkungsdiagramme der Auswirkungen von hoher (a) und geringer (b) Dichte auf den ÖV-Anteil und das ÖV-Angebot. Eigene Darstellung.

Hiernach führt eine höhere Dichte (in einem gegebenen räumlichen Betrachtungsbe-
reich) zu einer höheren Nachfrage an Ortsveränderungen. Aus dieser resultiert wieder-
um zunächst eine Zunahme der IV-Nachfrage. Durch die höhere IV-Nachfrage erhöhen
sich Auslastungsbedingt die Reisezeiten im MIV. Bei gegebener Straßeninfrastruktur ist
dieser Zusammenhang eindeutig. Aber auch generell ist dieser Wirkungszusammen-
hang vorhanden, da sich die IV-Kapazität durch Ausbau nicht beliebig steigern lässt,
und insbesondere bei hohen Besiedelungsdichten ein solcher Ausbau schwierig ist.

Durch die höhere IV-Reisezeit verringern sich die Reisezeitvorteile, die der MIV in
der Regel auf der Mehrzahl der Relationen gegenüber dem ÖV bietet, wodurch der An-
teil der Personen, die den Modus ÖV wählen bzw. die Wahlwahrscheinlichkeit steigt.
Die ÖV-Nachfrage ergibt sich als Produkt aus der Wahlwahrscheinlichkeit und der Ge-
samtnachfrage, wodurch sie sowohl durch die Erhöhung der Gesamtnachfrage als auch
durch die höhere Wahlwahrscheinlichkeit steigt.

Die höhere ÖV-Nachfrage erhöht bei gegebenem ÖV-Angebot die Auslastung. Die
höhere ÖV-Auslastung führt zu höheren Fahrgeldeinnahmen je angebotener Fahrplan-
fahrt (hier als „Fahrgelderlöseffizienz“ bezeichnet) und somit zu höheren Einnahmen.
Durch diese wird es zum einen möglich, ein besseres ÖV-Angebot anzubieten, und zum
anderen alternativ oder zusätzlich dazu die Fahrpreise zu senken. Die höhere Auslas-
tung wirkt auch unabhängig von der Erlösbetrachtung auf das ÖV-Angebot, da hierfür
ein höherer Ressourceneinsatz vertretbar erscheint, und ganz direkt dadurch, dass bei
Überschreiten der Kapazitätsgrenze eine Angebotsausweitung notwendig wird.

Die höhere ÖV-Qualität kann unterschiedliche Formen annehmen: Zum Beispiel ein
dichter Takt je Linie oder mehr Direktverbindungen durch Überlagerung von Linien, ein
(räumlich) dichteres Liniennetz und eine höhere Zahl bzw. Dichte von Haltestellen. Auch
„weiche Komfortfaktoren“ wie die Ausstattung von Fahrzeugen und Haltestellen oder
die Wahl eines anderen Verkehrssystems (*Schienenbonus*) stellen eine Erhöhung der
ÖV-Angebotsqualität dar. Durch ein anderes Verkehrssystem oder Änderungen am Lini-
ennetz können außerdem schnellere Verbindungen ermöglicht werden. Dichtere Takte
reduzieren auf Umsteigeverbindungen ggf. die Reisezeiten und erhöhen die Zuverläs-
sigkeit.

Durch günstigere Fahrpreise oder/und ein besseres ÖV-Angebot erhöht sich wieder-
um die Wahlwahrscheinlichkeit des ÖV in der Moduswahl. Dadurch entsteht ein „positi-
ves Feedback-Loop“, also eine Selbstverstärkung.

Weiterhin führt eine hohe Dichte in Verbindung mit der hohen MIV-Nachfrage zu ei-
ner Knappheit der Parkmöglichkeit, also einem hohen Parkdruck. Dieser kann entweder
direkt über die notwendige Suchzeit bzw. damit verbundene Unsicherheit, oder durch

Monetarisierung in Form von (höheren) Parkgebühren ebenfalls die Moduswahl zu Ungunsten des MIV und somit zu Gunsten des ÖV verändern.

Konstant große Probleme oder hohe Kosten beim Abstellen von Pkw führen gegebenenfalls in Verbindung mit einem ÖV-Angebot mit schnellen Verbindungen, hoher zeitlicher Verfügbarkeit und hoher Zuverlässigkeit zur Entscheidung, keinen eigenen Pkw anzuschaffen (oder weniger Pkw pro Haushalt vorzuhalten). Dadurch verringert sich ebenfalls die Zahl der Wege, für die der Modus MIV gewählt wird, erheblich zu Gunsten des ÖV (sowie weiterer Alternativen). (Die Wirkungen über die Pkw-Beschaffungen sind gestrichelt dargestellt, da sie nicht in den Bereich der Verkehrsentscheidungen fallen, die einem klassischen Verkehrsnachfragemodell entsprechen, sondern der vorgelagerten Modellstufe der Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle zugeordnet sind (vgl. Abbildung 3.1).)

Im Diagramm in Abbildung 2.1b sind die gegenteiligen Wirkungen als Auswirkungen einer geringen Dichte dargestellt. Zusätzlich wird hierbei noch verdeutlicht, dass eine geringe Dichte die Bündelung von Verkehrsströmen erschwert, was zum einen zu einer geringen Auslastung auf den möglichen ÖV-Linien führt und generell das Anbieten einer guten Angebotsqualität mit vertretbarem Mitteleinsatz erschwert.

2.6 Betrachtung realer Modal-Split-Daten

Der Eindruck, dass der ÖV-Anteil in dichter besiedelten Städten höherer ist als in weniger dicht besiedelten, soll anhand von realen Daten überprüft werden.

Genutzt wurde eine von der *Agora Verkehrswende* bereitgestellte Zusammenstellung von Steckbriefen zur Verkehrssituation in 35 deutschen Städten [6]. Darin enthalten sind für jede dieser Städte unter anderem Basisdaten wie Bevölkerungsdichte, Einwohnerzahl, Zahl der Studierenden sowie Daten zum aufkommensbezogenen Modal Split, welche aus dem *MiD 2017* [7] gewonnen wurden. In der Veröffentlichung [6] wird ausgesagt, dass der ÖV-Anteil bei Städten mit zunehmender Einwohnerzahl der Städte zunimmt, auf die Dichte wird dabei kein Bezug genommen. Es soll also auch untersucht werden, welche der beiden Größen ausschlaggebender bzw. die bessere erklärende Größe ist. Die genutzten Daten finden sich im Anhang (Tabelle E.1).

Zusammenhang zwischen Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte

Um die Abhängigkeit von unterschiedlichen möglichen Erklärgrößen beurteilen zu können, muss zunächst untersucht werden, inwieweit diese Erklärgrößen unabhängig oder abhängig voneinander sind. Darum wird zunächst der Zusammenhang bzw. die Kor-

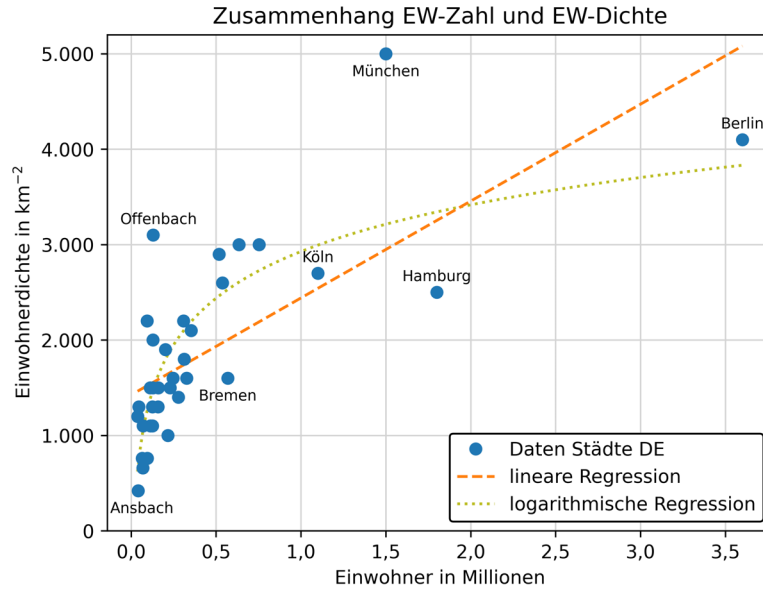


Abbildung 2.2: Einwohnerdichte deutscher Städte aufgetragen über die Einwohnerzahl mit Regressionsfunktionen.

relation zwischen der absoluten Einwohnerzahl und der Einwohnerdichte ermittelt. Die entsprechende Darstellung findet sich in Abbildung 2.2, darin sind für die Städte als Datenpunkte die Einwohnerzahl und die Bevölkerungsdichte gegeneinander aufgetragen.

Der Korrelationskoeffizient wurde mit einer Funktion des Python-Pakets *SciPy* [8] berechnet. Für die Korrelation von Einwohnerzahl n_{EW} und Bevölkerungsdichte ρ_{EW} ergibt sich ein Wert von:

$$R_{n_{EW}, \rho_{EW}} = 0,7055, \quad (2.1)$$

was einen deutlichen Zusammenhang darstellt. Die zentrale Aussage lässt sich formulieren als: „Die größeren Städte in Deutschland sind tendenziell auch die dichter besiedelten Städte.“ Da somit die beiden Größen nicht als unabhängig angesehen werden können, muss immer beachtet werden, dass eine festgestellte Korrelation mit einer weiteren Größe auch eine Auswirkung der jeweils anderen Größe sein kann. Außerdem sind in Abbildung 2.2 auch Regressionsfunktionen an die Daten abgebildet. Für eine lineare Regression mit der Form $y = m \cdot x + c$ ergibt sich:

$$m = 1,016 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{km}^2}, \quad c = 1,425 \cdot 10^3 \frac{\text{EW}}{\text{km}^2}. \quad (2.2)$$

Die Darstellung legt die Vermutung nahe, dass eine lineare Funktion jedoch nicht die beste Beschreibung dieses Zusammenhangs bietet. Auch praktischen Überlegungen

sprechen hier gegen einen linearen Zusammenhang: die Einwohnerzahl einer Stadt ist nach oben kaum beschränkt, die Dichte ebenso wie auch der Modal Split hingegen schon, wenn auch nicht mit einer scharfen Grenze. Dies legt die Beschreibung des Zusammenhangs durch eine degressive Funktion, beispielsweise einen logarithmischen Zusammenhang, nahe. Mit einer logarithmischen Regression der Form $y = a \cdot \ln(b \cdot x)$ ergibt sich¹:

$$a = 706,203 \frac{E_w}{\text{km}^2}, \quad b = 6,3131 \cdot 10^{-5} \frac{1}{E_w}. \quad (2.3)$$

Diese logarithmische Funktion scheint den Zusammenhang deutlich besser zu beschreiben.

Die Regressionsfunktionen wurden primär zur besseren visuellen Erfassung des Zusammenhangs hinzugefügt. Ziel dieser Untersuchung ist es auch nicht, die Zusammenhänge durch eine mathematische Funktion quantitativ zu beschreiben (dafür wäre die Stichprobe auch zu gering), sondern zu überprüfen, ob jeweils ein Zusammenhang besteht. Auf die Parameter der Regressionsfunktionen wird deshalb im folgenden nicht mehr eingegangen, sie sind für alle gezeigten Regressionsfunktionen in Tabelle E.3 im Anhang dokumentiert. Eine Vergleichbarkeit der Zahlenwerte ist ohnehin nicht gegeben, da jeweils unterschiedliche physikalische Größen betrachtet werden.

Abhängigkeit des Modal Split von Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte

In Abbildung 2.3 wurde der ÖV-Anteil $\phi_{\text{ÖV}}$ im aufkommensbezogenen Modal Split über die Einwohnerzahl und über die Einwohnerdichte aufgetragen. Die Untersuchung der Korrelationen ergibt hier:

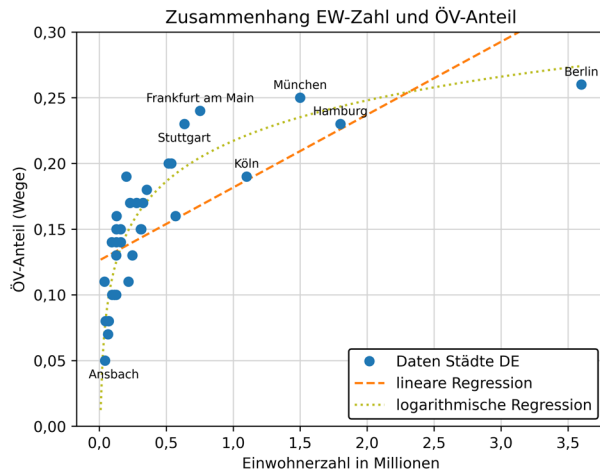
$$R_{n_{E_w}, \phi_{\text{ÖV}}} = 0,7014, \quad (2.4)$$

$$R_{\rho_{E_w}, \phi_{\text{ÖV}}} = 0,8621. \quad (2.5)$$

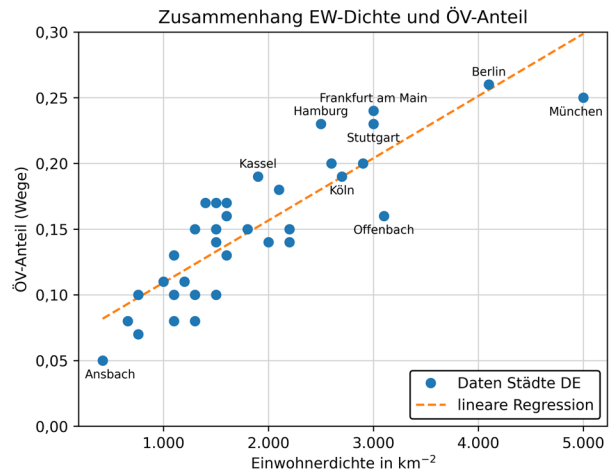
Somit hängt der ÖV-Einteil in der untersuchten Stichprobe deutlich stärker von der Einwohnerdichte als der absoluten Einwohnerzahl ab. Dies ist auch optisch gut aus Abbildung 2.3 ersichtlich. Der Korrelationskoeffizient von 0,86 entspricht einer sehr starken Korrelation. Da wie in der vorangegangenen Untersuchung die beiden potentiellen Erklärgrößen nicht unabhängig, sondern selbst korreliert sind, befindet sich auch der Wert des Korrelationskoeffizienten zwischen der Einwohnerzahl und dem ÖV-Anteil auf einem recht hohem Niveau.

In Abbildung 2.4 wurde der MIV-Anteil im aufkommensbezogenen Modal Split über die Einwohnerzahl und über die Einwohnerdichte aufgetragen. Betrachtet wurde dabei

¹ Aufgrund der Identität $\log(p \cdot q) = \log(p) + \log(q)$ ist dies äquivalent zu $y = a \cdot \ln(x) + c$, hat jedoch im Gegensatz dazu den Vorteil, dass Einheitenbehaftet gerechnet werden kann.

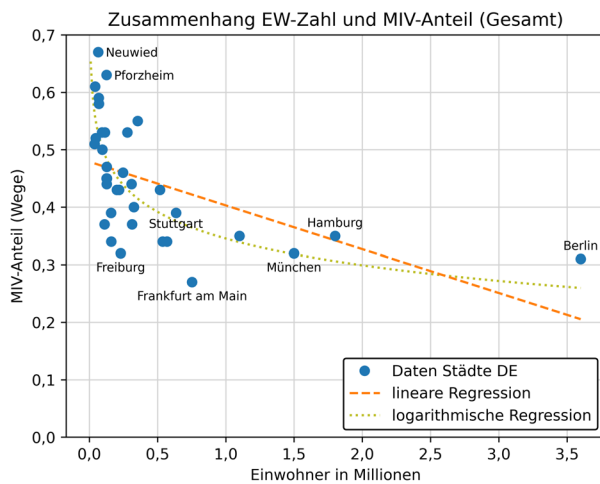


(a)

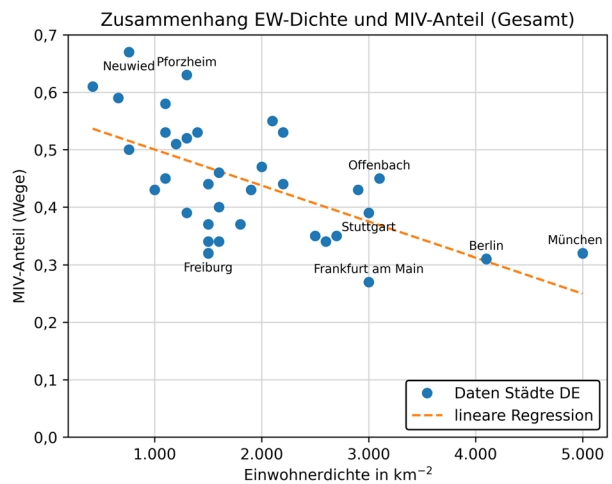


(b)

Abbildung 2.3: ÖV-Anteil im aufkommensbezogenen Modal Split für deutsche Städte aufgetragen über die Einwohnerzahl (a) und die Einwohnerdichte (b) mit Regressionsfunktionen.



(a)



(b)

Abbildung 2.4: Gesamt-MIV-Anteil (Wege als Selbstfahrer und als Mitfahrer) im aufkommensbezogenen Modal Split für deutsche Städte aufgetragen über die Einwohnerzahl (a) und die Einwohnerdichte (b) mit Regressionsfunktionen.

der gesamte MIV-Anteil, also die Summe der Wege als Selbstfahrer und der Wege als Mitfahrer:

$$\phi_{\text{MIV,ges}} = \phi_{\text{MIV,s}} + \phi_{\text{MIV,m}} . \quad (2.6)$$

Hierbei ergeben sich als Korrelationskoeffizienten:

$$R_{n_{\text{Ew}}, \phi_{\text{MIV,ges}}} = -0,5116 , \quad (2.7)$$

$$R_{\rho_{\text{Ew}}, \phi_{\text{MIV,ges}}} = -0,6069 . \quad (2.8)$$

Auch hier zeigt sich sowohl optisch als auch in den Zahlenwerten der Korrelationskoeffizienten eine deutlichere Abhängigkeit des Modal-Split-Wertes des MIV von der Einwohnerdichte als von der Einwohnerzahl.

Abbildung 2.5 zeigt den Anteil der Slow-Modes im aufkommensbezogenen Modal Split in Abhängigkeit der Einwohnerzahl und der Einwohnerdichte. Hierbei ergeben sich als Korrelationskoeffizienten:

$$R_{n_{\text{Ew}}, \phi_{\text{slow}}} = 0,1838 , \quad (2.9)$$

$$R_{\rho_{\text{Ew}}, \phi_{\text{slow}}} = 0,2079 . \quad (2.10)$$

Diese Korrelationskoeffizienten sind sehr gering, es besteht also kaum eine Abhängigkeit, wie auch die Diagramme veranschaulichen. Auch hier ist die Abhängigkeit von der Einwohnerdichte etwas ausgeprägter als von der Einwohnerzahl.

Einfluss des Studierendenanteils

Da für die Auswahl an Städten auch Daten zu den Studierendenzahlen vorlagen und Studierende gemeinhin als ÖV-affine Personengruppe gelten, wurde auch ein möglicher Einfluss des Studierendenanteils ω_{stud} in einer Stadt auf den Modal Split untersucht.

Die entsprechende Darstellung findet sich in Abbildung 2.6a. Sowohl optisch als auch im Korrelationskoeffizient von

$$R_{\omega_{\text{stud}}, \phi_{\text{ÖV}}} = 0,0045 \quad (2.11)$$

ist in dieser Stichprobe keine Abhängigkeit des ÖV-Anteils vom Studierendenanteil festzustellen. Stattdessen zeigt sich jedoch eine leichte Korrelation des Studierendenanteils mit zunehmendem Modal Splits der Slow Modes Fuß ($R_{\omega_{\text{stud}}, \phi_{\text{Fuß}}} = 0,3698$), Rad ($R_{\omega_{\text{stud}}, \phi_{\text{Rad}}} = 0,2887$) bzw. zusammengefasst ($R_{\omega_{\text{stud}}, \phi_{\text{slow}}} = 0,4388$) und mit leicht abnehmendem MIV-Anteil ($R_{\omega_{\text{stud}}, \phi_{\text{MIV,ges}}} = -0,3165$), siehe auch Abbildung 2.6b – e.

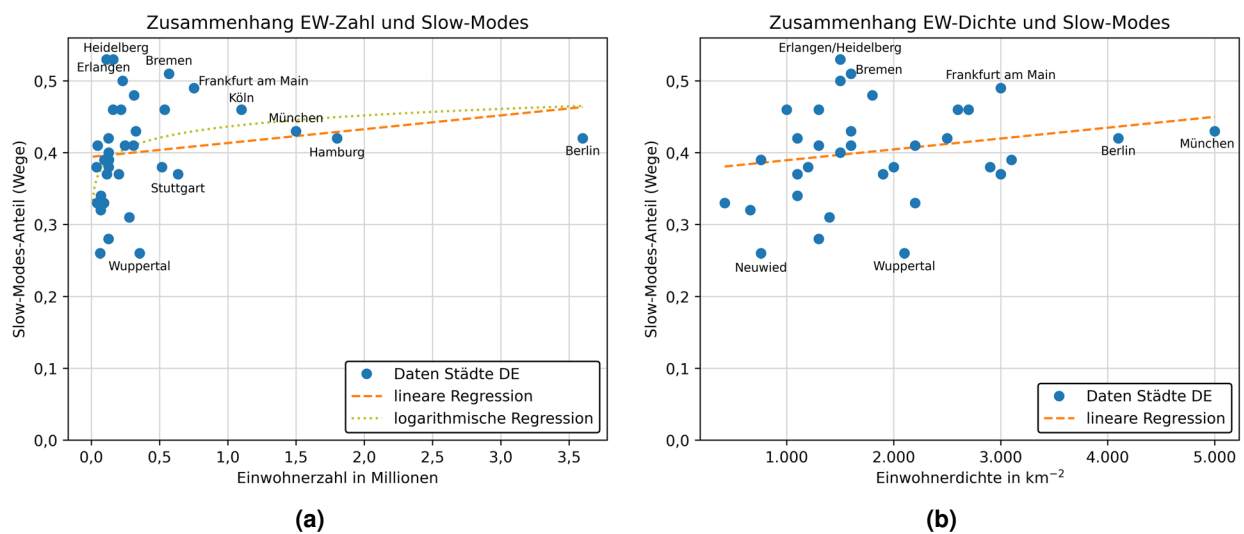


Abbildung 2.5: Slow-Modes-Anteil (Wege als Radfahrer und als Fußgänger) im aufkommensbezogenen Modal Split für deutsche Städte aufgetragen über die Einwohnerzahl (a) und die Einwohnerdichte (b) mit Regressionsfunktionen.

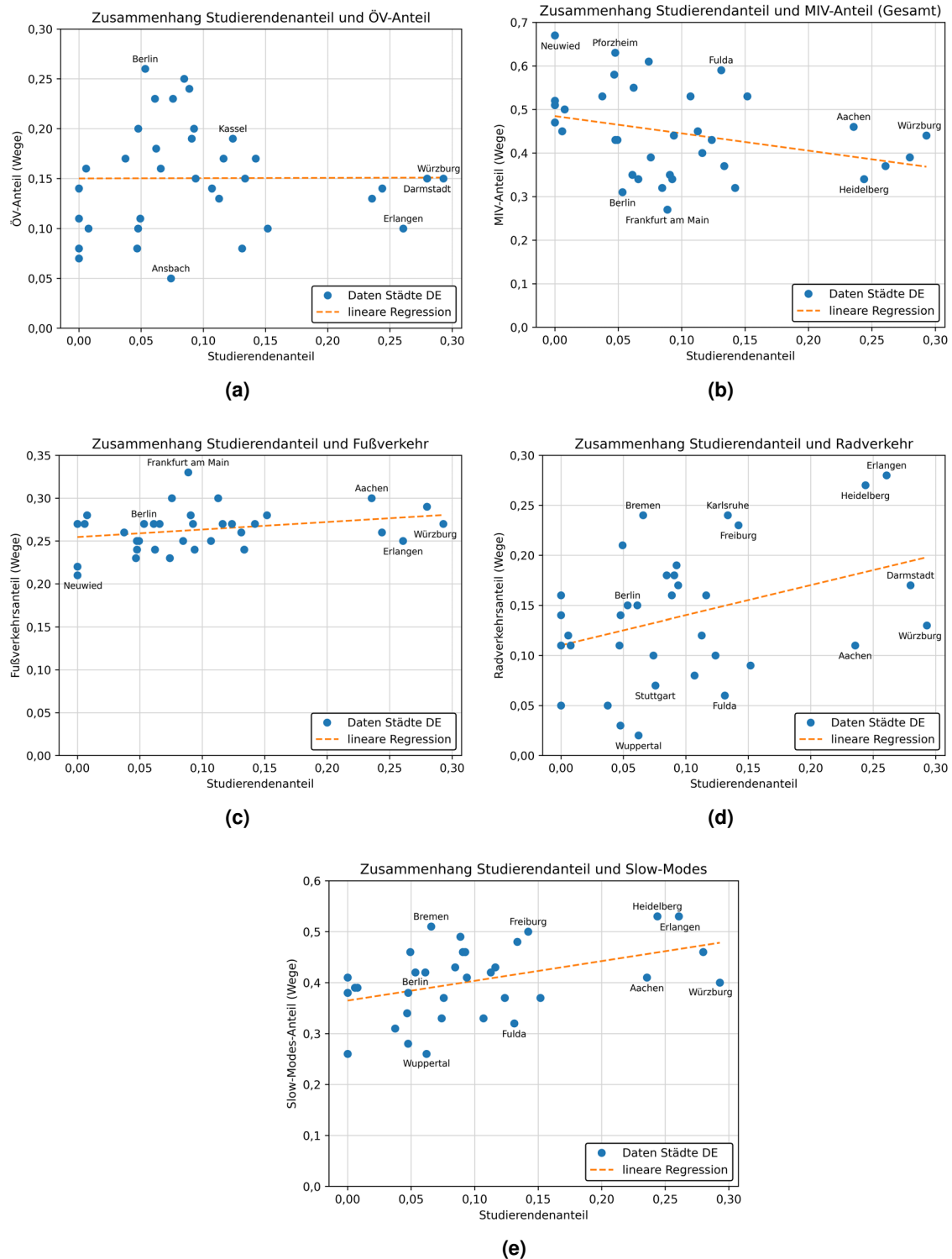


Abbildung 2.6: Anteile des ÖV (a), des MIV (Summe Selbst- und Mitfahrer, b) sowie der Slow-Modes Fuß und Rad einzeln (c, d) und gemeinsam (e) am aufkommensbezogenen Modal Split für 35 deutsche Städte in Abhängigkeit des Studierendenanteils jeweils mit Regressionsgerade.

3 Verkehrsnachfragemodelle

3.1 Modelle der Verkehrsplanung

Verkehrsmodelle sind wichtige Instrumente der Verkehrsplanung und der Verkehrsforschung. Nur mit ihrer Hilfe lassen sich die Auswirkungen zukünftiger Entwicklungen oder geplanter Maßnahmen untersuchen, bevor diese eingetreten bzw. umgesetzt sind, sowie Zustände untersuchen, die in der Realität so nicht vorliegen.

Wie alle Modelle sind die Modelle der Verkehrsplanung eine Abstraktion und damit einhergehend eine Vereinfachung der komplexeren Realität [9].

Zur Modellierung des Verkehrs müssen verkehrsrelevante Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer auf unterschiedlichen Zeitskalen nachgebildet werden [10]. Für die Nachbildung unterschiedlicher Entscheidungen werden in der Verkehrsplanung und Verkehrswissenschaft unterschiedliche Modelle genutzt [9]:

- *Flächennutzungsmodelle* bilden die Wahl von Wohnstandorten und die Standortwahl von Einrichtungen, die Aktivitätenorte darstellen, ab.
- *Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle* bilden die Entscheidungen zur Beschaffung von Fahrzeugen oder ÖV-Zeitkarten ab.
- *Verkehrsnachfragemodelle* modellieren die Zahl und Eigenschaften von im Verkehrsnetz durchgeführten Ortsveränderungen. Dazu werden Aktivitätenwahl, Zielwahl, Moduswahl, Routenwahl und ggf. Abfahrtszeitwahl nachgebildet. Es ergibt sich daraus auch die Belastung des Verkehrsnetzes durch Fahrten.
- *Verkehrsflussmodelle* bilden den Verkehrsablauf im Straßenraum nach, wofür im Kraftfahrzeugverkehr beispielsweise Entscheidungen wie Geschwindigkeits-, Fahrstreifen- und Abstandswahl nachgebildet werden müssen.

Abbildung 3.1 zeigt eine Übersicht der verbreiteten Modelltypen und der ihnen zugeordneten Entscheidungen.

In der klassischen Verkehrsplanung kommt den Verkehrsnachfragemodellen eine besondere Bedeutung zu. Sie bilden auch die Basis dieser Arbeit. Die übrigen Abschnitte dieses Kapitels betrachten ausschließlich Verkehrsnachfragemodelle.

▪ Standortwahl	Flächennutzungsmodelle
▪ Fahrzeugbeschaffungswahl	Verkehrsmittel- verfügbarkeitsmodelle
▪ Zeitkartenbeschaffungswahl	
▪ Aktivitätenwahl	Verkehrsnachfragemodelle
▪ Zielwahl	
▪ Verkehrsmoduswahl	
▪ Abfahrtszeitwahl	
▪ Routenwahl	
▪ Geschwindigkeitswahl	Verkehrsflussmodelle
▪ Fahrstreifenwahl	
▪ Fahrzeugfolgeabstandswahl	

Abbildung 3.1: Verkehrsrelevante Entscheidungen und ihre Zuordnung zu Modellen der Verkehrsplanung. Aus [9].

3.2 Unterschiedliche Modellansätze

Synthetische und inkrementelle Modelle

Modelle, in denen die Verkehrsnachfrage mit einem Verhaltensmodell aus den Strukturdaten abgeleitet wird, werden als synthetische Modelle bezeichnet. Demgegenüber werden in einem inkrementellen Modell nur Veränderungen an einer bestehenden, z.B. aus Erhebungen bekannten, Nachfragematrix berechnet.

Wenn die zu betrachtenden Änderungen an Siedlungsstruktur oder Verkehrsangebot groß sind und somit eine grundsätzliche Veränderung der Nachfragestruktur erwartet werden kann, sollten synthetische Modelle genutzt werden. Für Fälle, in denen nur kleine Änderungen betrachtet werden, eignen sich oft auch inkrementelle Modelle [11].

Mikroskopische und makroskopische Modelle

In mikroskopischen Modellen werden die einzelnen Verkehrsteilnehmer als Objekte modelliert und meist als Agenten bezeichnet. Diese werden in der Regel als *synthetische Bevölkerung* auf Grundlage der Stichprobe aus einer Haushaltsbefragung erzeugt [10]. Die Agenten besitzen bestimmte Eigenschaften wie Erwerbstätigkeit, Pkw-Besitz und die Zuordnung zu einem Wohn- und Arbeitsort. Im mikroskopischen Modell treffen diese Agenten Entscheidungen. An den Agenten-Objekten können die Entscheidungen und die Wege durchs Netz nachvollzogen werden.

Makroskopische Modelle modellieren demgegenüber keine Einzelpersonen. Bei der

makroskopischen Modellierung werden Objekte aus der realen Welt in aggregierten Größen zusammengefasst [10]. Entscheidungen werden nicht von Einzelobjekten getroffen, sondern als eine Aufteilung der aggregierten Größen modelliert. Daher sind die Verkehrsstärken in makroskopischen Modellen rationale Zahlen, während sie in mikroskopischen stets ganzzahlig sind.

Makroskopische Modelle versuchen, das „durchschnittliche Verhalten“ zu modellieren und führen deshalb zu genau einer Lösung, die sich aus den Modellfestlegungen als deterministisches Ergebnis der entsprechenden Verfahren ergibt. Demgegenüber sind mikroskopische Modelle Zufallsexperimente, die mehrfach ausgeführt werden müssen, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten [10].

In dieser Arbeit werden im Folgenden ausschließlich makroskopische synthetische Modelle betrachtet.

3.3 Segmentierung der Nachfrage

Um die Berechnungen mit aggregierten Größen zu ermöglichen, muss die Nachfrage zusammengefasst werden. Gleichzeitig sollen für die Berechnung relevante wesentliche Unterschiede erhalten bleiben.

Die Bevölkerung wird daher in *verhaltenshomogene Personengruppen* unterteilt. Die von diesen Personengruppen ausgelöste Verkehrsnachfrage wird zudem nach *Wege-zwecken* unterschieden. Modelle, die diese Aufteilungen treffen, werden als *disaggregierte Modelle* bezeichnet [9]. Sie ermöglichen eine unterschiedliche Behandlung dieser Segmente in der Modellberechnung und somit die Unterscheidung von je nach Kontext unterschiedlichem Verhalten. Beide genannten Aufteilungen können in unterschiedlicher Granularität vorgenommen werden.

Räumlich wird das Modell in *Verkehrszellen* unterteilt. Wesentliche Eigenschaften der Verkehrszellen sind die Anzahl der Einwohner in den unterschiedlichen Personengruppen, Strukturgrößen wie Arbeitsplätze und Einkaufsmöglichkeiten sowie die Erreichbarkeit über das Verkehrsnetz. Daher sollten innerhalb einer Verkehrszelle räumlich keine zu starken Unterschiede in Bezug auf diese Aspekte herrschen. Dies muss beim Zugschnitt des Modellraums in Verkehrszellen berücksichtigt werden. Die Nachfrage auf Basis der Verkehrszellen bildet in makroskopischen Modellen die Grundlage sämtlicher Berechnungen. Die Kombination einer Quell- und einer Zielzelle wird in diesem Zusammenhang als *Relation* bezeichnet.

3.4 Vier-Stufen-Algorithmus

Unter der Bezeichnung Vier-Stufen-Algorithmus versteht man die Zerlegung der Verkehrsnachfrageberechnung in vier Teilmodelle oder *Modellstufen*, die sequenziell abgearbeitet werden können. Die vier Modellstufen sind [9, 10, 11]:

- *Verkehrserzeugung* oder *Aktivitätenwahl*,
- *Verkehrsverteilung* oder *Zielwahl*,
- *Verkehrsaufteilung* oder *Moduswahl*,
- *Umlegung* oder *Routenwahl*.

Die sequenzielle Berechnung dieser Teilmodelle in dieser Reihenfolge gilt als typisch. Die Modellvorstellung des Vier-Stufen-Algorithmus ist, dass die Verkehrsteilnehmer diese Entscheidungen nacheinander in dieser Reihenfolge treffen. Da die Wahlentscheidungen in der Realität jedoch nicht streng sequenziell und nicht unabhängig voneinander getroffen werden, nutzen moderne Verkehrsnachfragemodelle häufig Rückkopplungen zwischen den Stufen oder die Zusammenfassung (Integration) mehrerer Modellstufen zu komplexeren Entscheidungsmodellen. Ebenfalls möglich ist das Hinzufügen zusätzlicher Modellstufen. Dennoch bildet die Unterteilung der Nachfrageberechnung in diese Teilprobleme bzw. Teilfragestellungen bis heute die grundlegende Modellvorstellung der Verkehrsnachfragemodellierung.

Verkehrserzeugung

In der Verkehrserzeugung wird die Wahl der Verkehrsteilnehmer abgebildet, wie viele und welche Aktivitäten, die eine Ortsveränderung erfordern, sie durchführen möchten. Für Aktivitätenorte wird bestimmt, wie viele Personen sie anziehen. Als Ergebnis steht die Verkehrsnachfrage in Form von erzeugten und angezogenen Wegen je Verkehrszelle (üblicherweise unterteilt nach Personengruppen und Wegezwecken).

Zielwahl

In der Zielwahl wird die Entscheidung der Verkehrsteilnehmer für einen von mehreren möglichen Aktivitätenorten für eine Aktivitätenart nachgebildet. Dabei werden die erzeugten und angezogenen Wege zu Quelle-Ziel-Paaren verknüpft. Neben dem Ergebnis der Verkehrserzeugung sind dazu Informationen zu einem Widerstand zwischen Verkehrszellen, also über das Verkehrsangebot, erforderlich. Ergebnis der Zielwahl ist eine Nachfragematrix (bzw. mehrere unterteilt nach Personengruppen und Wegezwecken).

Moduswahl

In der Moduswahl wird die Entscheidung der Verkehrsteilnehmer ermittelt, mit welchem Verkehrsmittel sie ihre Ortsveränderung durchführen möchten. Dazu sind Informationen zu unterschiedlichen Widerständen in den unterschiedlichen Modi notwendig. Ergebnis der Moduswahl sind mehrere, nach Modus unterteilte Nachfragematrizen.

Umlegung

In der Umlegung oder Routenwahl wird die Entscheidung der Verkehrsteilnehmer abgebildet, auf welchem konkreten Weg sie sich mit dem gewählten Verkehrsmittel durch das Verkehrsnetz bewegen möchten. Dabei wird die Nachfrage von der reinen Relationsebene mit Matrizen in das modellierte Verkehrsnetz mit Strecken und Knoten übertragen. Das Ergebnis der Umlegung sind die Verkehrsstärken (Belastungen) auf den einzelnen Netzelementen. Wird außerdem je Relation die Aufteilung auf die unterschiedlichen Routen gespeichert, können Informationen zur Verkehrssituation zurück auf die Relationsebene übertragen werden (Kenngrößenmatrizen).

3.5 VISEM-Wegekettensmodell

Beim VISEM-Wegekettensmodell erfolgt die Verkehrserzeugung nicht in Form von Einzelaktivitäten/Einzelwegen, sondern als Wegeketten, die mehrere aufeinanderfolgende Aktivitäten bis zum Wiedererreichen der Wohnung enthalten können. Für jede definierte Wegekette muss dabei für jede Personengruppe eine Erzeugungsrate festgelegt werden.

Die Zielwahl und die Moduswahl werden im VISEM-Modell nicht sequenziell, sondern hierarchisch simultan berechnet. So kann bei der Zielwahl die Erreichbarkeit mit unterschiedlichen Modi im korrekten Verhältnis (entsprechend der gleichzeitig stattfindenden Moduswahl) berücksichtigt werden. Dazu kann die sogenannte *Logsumme* genutzt werden, der Logarithmus aus der Summe der mit der Exponentialfunktion transformierten Einzelnutzen [12], wie sie für die Moduswahl verwendet werden.

Beim VISEM-Modell erfolgt auf Basis des ersten Weges eine Moduswahl [12, S. 283], ohne Betrachtung der weiteren Wege der Wegekette. Wird dabei ein *nicht austauschbarer Modus* (z.B. Pkw als Selbstfahrer) gewählt, so wird dieser Modus für die gesamte Wegekette beibehalten. Wird ein *austauschbarer Modus* (z.B. ÖV, Fuß, Pkw als Mitfahrer) gewählt, wird (sofern es mehrere austauschbare Modi im Modell gibt) für jeden weiteren Weg der Kette eine weitere Moduswahl zwischen den austauschbaren Modi

durchgeführt [12].

Durch die Verwendung von geschlossenen Wegeketten werden die Randsummenbedingungen, dass in jeder Verkehrszelle gleich viele Wege beginnen wie enden, automatisch erfüllt. Auch dass dies segmentiert je Personengruppe sowie für nicht austauschbare Modi gelten muss und jeweils eine sinnvolle Kombination an Wegezwecken bzw. Aktivitätenübergängen darstellt wird damit sichergestellt.

3.6 Entscheidungsmodelle

Im Rahmen der Zielwahl, der Moduswahl sowie der Umlegung (Routenwahl bzw. Verbindungswahl) treffen die Verkehrsteilnehmer in der Regel Wahlentscheidungen zwischen mehreren möglichen Alternativen. Dabei wählen jedoch nicht stets alle Verkehrsteilnehmer in der gleichen Entscheidungssituation die gleiche Alternative, sodass es zu einer Aufteilung auf die Alternativen kommt. Um dieses Verhalten nachzubilden kommen Modelle zum Einsatz, die als Entscheidungsmodelle [9], (diskrete) Wahlmodelle [10, 3], Aufteilungsmodelle [12] oder Random-Utility-Models [13] bezeichnet werden.

Ausgangspunkt dieser Modelle ist die Vorstellung, dass die Entscheidung zugunsten der Alternative mit dem größten *persönlichen Nutzen* fällt, welcher sich aus einem *objektiv bestimmbaren Nutzenanteil* und einem unbekannten *subjektiven Nutzenanteil* (auch als *stochastischer Nutzenanteil* bezeichnet) zusammensetzt. Modelliert wird die Aufteilung auf Basis der bekannten objektiven Nutzenkomponenten der Alternativen und der Annahme über eine zugrundeliegende Verteilung der subjektiven Nutzen.

Ein häufig verwendetes [9, S. 133] Aufteilungsmodell ist das sogenannte Logit-Modell. Die Wahrscheinlichkeit bzw. der Anteil p_i der Wahl einer Alternative i aus der Menge aller Alternativen J ist dabei gegeben durch [9]:

$$p_i = \frac{e^{\beta \cdot u_i}}{\sum_{j \in J} e^{\beta \cdot u_j}}, \quad (3.1)$$

wobei u der objektive Nutzenanteil einer Alternative ist und β ein Skalierungsparameter, der die Empfindlichkeit beeinflusst. Beim Logit-Modell erfolgt die Aufteilung gemäß der Differenzen der bewerteten Nutzen [9, S. 130], das heißt eine additive Konstante zu den Nutzen aller Alternativen beeinflusst das Ergebnis nicht. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Logit-Modell für die Moduswahl, die Zielwahl und die Verbindungswahl bei der ÖV-Umlegung verwendet.

3.7 IV-Umlegung

In der IV-Umlegung wird die Entscheidung der Verkehrsteilnehmer für eine von mehreren möglichen Routen im Netz betrachtet. Durch die Umlegung ergibt sich auch die Belastung der Strecken mit Fahrten.

Bei der Entscheidung muss berücksichtigt werden, dass sich (im MIV) die Fahrzeiten im Netz mit zunehmenden Streckenbelastungen erhöhen. Da die Belastungen, die das Ergebnis der Umlegung darstellen, gleichzeitig für die Fahrzeitberechnung, also deren Grundlage, benötigt werden, sind Umlegungen üblicherweise iterative Verfahren. Um den Zusammenhang von Belastung und Fahrzeit abzubilden wird, insbesondere bei makroskopischen Modellen, in der Regel eine sogenannten *Capacity-Restraint-Funktion* (CR-Funktion) verwendet.

Eine sehr verbreitete [9, 3] CR-Funktion ist die sogenannte BPR-Funktion, die die folgende Form annimmt [3]:

$$t(q) = t_0 \cdot \left(1 + a \left(\frac{q}{q_{\max}} \right)^b \right), \quad (3.2)$$

wobei t_0 die Fahrzeit auf der betrachteten Strecke im unbelasteten Fall angibt, a und b die Parameter der BPR-Funktion sind, q die Belastung und q_{\max} die Kapazität der Strecke ist. Der Parameter a gibt an, um ein wievielfaches sich die Fahrzeit beim Erreichen der Kapazität q_{\max} gegenüber dem Fall $q = 0$ erhöht hat, der Parameter b bestimmt die Krümmung der Kurve.

Eine weitere relevante CR-Funktion ist die sogenannte LOHSE-Funktion, welche eine Modifikation der BPR-Funktion darstellt. Die LOHSE-Funktion geht ab einer als Parameter wählbaren Stelle sat_{crit} in die tangentielle lineare Fortsetzung an die exponentiell ansteigende BPR-Funktion über. Ziel dieser Modifikation ist es, im Überlastfall sowohl ein besseres Konvergenzverhalten der Umlegungsverfahren als auch eine realistischere Abbildung der Fahrzeiten zu ermöglichen [3]. Die LOHSE-Funktion nimmt die folgende Form an [3]:

$$t(q) = \begin{cases} t_0 \cdot \left[1 + a \cdot \left(\frac{q}{q_{\max}} \right)^b \right], & \frac{q}{q_{\max}} \leq \text{sat}_{\text{crit}} \\ t_0 \cdot \left[1 + a \cdot \text{sat}_{\text{crit}}^b + a \cdot b \cdot \text{sat}_{\text{crit}}^{b-1} \cdot \left(\frac{q}{q_{\max}} - \text{sat}_{\text{crit}} \right) \right], & \frac{q}{q_{\max}} > \text{sat}_{\text{crit}} \end{cases} \quad (3.3)$$

Abbildung 3.2 zeigt eine LOHSE-Funktion und die zugehörige BPR-Funktion im Vergleich.

Eine IV-Umlegung kann mit (*dynamisch*) oder ohne (*statisch*) Berücksichtigung einer Zeitachse durchgeführt werden. In dynamischen Umlegungen werden die Abfahrtszeit-

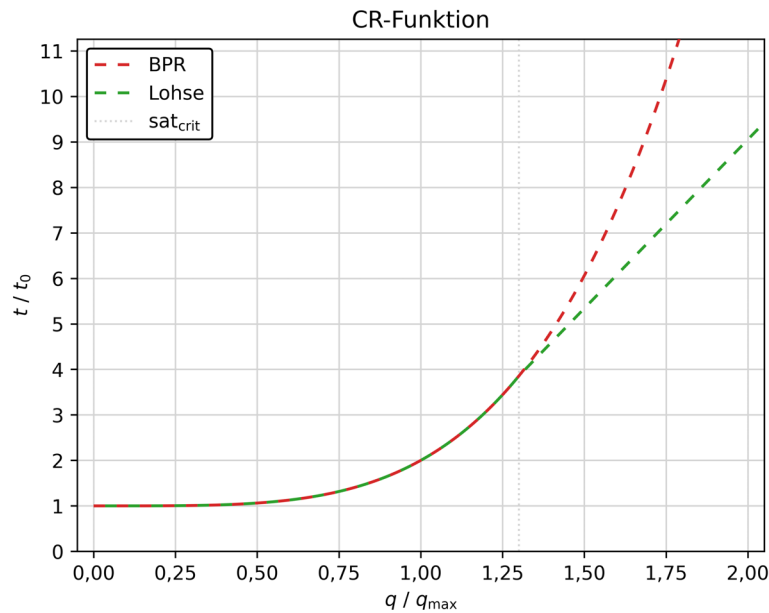


Abbildung 3.2: BPR-Funktion und LOHSE-Funktion mit den Parametern $a = 1$, $b = 4$ und $\text{sat}_{\text{crit}} = 1,3$ im Vergleich. Eigene Darstellung.

punkte und die für die Propagation durchs Netz notwendige Zeitdauer berücksichtigt. In statischen Umlegungen wird die gesamte Nachfrage des Umlegungszeitraums (beispielsweise eines Tages) zusammengefasst betrachtet [9].

Statische Umlegungen in makroskopischen Modellen arbeiten in der Regel nicht mit einem Entscheidungsmodell gemäß Abschnitt 3.6, sondern bestimmen als *Gleichgewichtsumlegung* für eine gegebene Nachfrage den Netzzustand, der das 1. *Wardrop-sche Prinzip* (*Nutzergleichgewicht*) erfüllt [9]. Dies bedeutet, dass kein Verkehrsteilnehmer durch die Wahl einer anderen Route seine persönliche Reisezeit verringern kann, und folglich, dass für eine Start-Ziel-Relation auf allen Routen, die mit Nachfrage belegt sind, die gleiche Reisezeit notwendig ist.

3.8 ÖV-Umlegung

In der ÖV-Umlegung wird die Entscheidung der Verkehrsteilnehmer für eine von mehreren möglichen (räumlichen) Routen bzw. (raum-zeitlichen) Verbindungen im Netz betrachtet. Durch die Umlegung ergibt sich auch die Belastung der Strecken und ggf. der Fahrplanfahrten mit Fahrgästen.

Eine ÖV-Umlegung kann verkehrssystemfein (streckenbasiert), taktfein (taktbasiert) oder fahrplanfein (fahrplanbasiert) durchgeführt werden [9, 12]. Dafür sind jeweils unterschiedliche Datenmodelle des ÖV-Angebots notwendig. Die verkehrssystemfeine Umle-

gung eignet sich eher als ein Hilfsmittel zur Liniennetzplanung als für aussagekräftige Modellrechnungen [12].

Bei der taktfeinen oder fahrplanfeinen ÖV-Umlegung wird in der Regel ein Widerstand (negativer Nutzen) der möglichen Alternativen bestimmt und ein Wahlmodell wie in Abschnitt 3.6 vorgestellt verwendet. Dazu müssen in einem ersten Schritt zunächst die in Frage kommenden Routen bzw. Verbindungen ermittelt werden. In einem zweiten Schritt erfolgt die Aufteilung der Nachfrage auf die gefundenen Alternativen.

Der Widerstand setzt sich aus Aspekten wie der Reisezeit, der Zahl der Umsteigevorgänge und ggf. Fahrpreis und Komfortaspekten sowie der zeitlichen Abweichung zur Wunschabfahrtszeit zusammen. Da diese Aspekte von unterschiedlichen Personen unterschiedlich gewichtet werden, ist hier ein Aufteilungsmodell der bessere Ansatz gegenüber der Wahl der „besten“ Alternative.

3.9 Rückkopplung

Nach dem Rechnen der Umlegung liegen Informationen zum Netzzustand und den Fahrzeiten vor, die sich von den bei Ziel- und Moduswahl zugrunde gelegten Annahmen unterscheiden können. Im vorliegenden Netzzustand würden also andere Entscheidungen getroffen als die, die zu diesem Zustand geführt haben. Dies stellt einen Widerspruch dar. Durch iterative Wiederholung von Zielwahl, Moduswahl und Umlegung wird in Kombination mit einer schrittweisen Mittelung belastungsabhängiger Angebotskenngrößen (z.B. IV-Reisezeit) ein Zustand erreicht, in dem die Abweichung zwischen dem Netzzustand, der als Annahme für die Ziel- und Moduswahl dient und dem Netzzustand, der sich nach der Umlegung einstellt, gering werden. Der Netzzustand konvergiert also zu einem Gleichgewichtszustand.

3.10 VISUM

VISUM [12] ist eine Software zum Erstellen, Bearbeiten, Rechnen und zur Ergebnisauswertung von makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen.

Als solche bietet VISUM eine grafische Benutzeroberfläche mit entsprechend geeigneten Editoren (z.B. für Netz und Fahrplan), Listenansichten und unterschiedliche Visualisierungsmöglichkeiten in der Netzansicht. Kern von VISUM bilden ein geeignetes Objektmodell und diverse implementierte Berechnungsverfahren. Für die einzelnen Objekttypen oder auf Ebene des Gesamtnetzes besteht die Möglichkeit, zusätzliche *benutzerdefinierte Attribute* festzulegen und mit diesen für den konkreten Anwendungsfall

spezifische Informationen vorzuhalten oder mit Formeln automatisiert zu berechnen.

Berechnungen werden in VISUM in einem *Verfahrensablauf* definiert, in dem eine Berechnungsroutine aus Einzelverfahren zusammengesetzt wird und zahlreiche Berechnungsparameter festzulegen sind. Dieser Verfahrensablauf kann einzeln als *.xml*-Datei gespeichert und so zwischen Modellen ausgetauscht werden.

Das zentrale Dateiformat von VISUM ist das binäre Format *Versionsdatei* (*.ver*), die das „komplette Modell“ enthält, also alle Eingangsdaten, Matrizen, den Verfahrensablauf sowie eventuelle Berechnungsergebnisse.

Die Eingangsdaten können auch in den textbasierten, „menschenslesbaren“ Dateiformaten *Netzdatei* (*.net*) und *Nachfragedatei* (*.dmd*) gespeichert und geladen werden. Dabei ist es auch möglich, nur Daten zu bestimmten Arten von Objekten zu speichern. So können auch die Eingangsdaten oder bestimmte Teile davon zwischen Modellen ausgetauscht werden.

Über die sogenannte *COM-Schnittstelle* (Einzelheiten in Abschnitt 8.2) ist es möglich, in einer Programmiersprache extern auf das Objektmodell von VISUM zuzugreifen und dabei Daten auszulesen oder Änderungen vorzunehmen sowie das Programm zu steuern.

4 Modellaufbau und Modelldokumentation

4.1 Grundannahmen

Für die Experimente soll ein einfaches bimodales Verkehrsmodell für den motorisierten Verkehr verwendet werden, also die Aufteilung auf die beiden Modi öffentlicher Verkehr und Individualverkehr mit Pkw betrachtet werden. Nichtmotorisierter Verkehr wird nicht betrachtet. Darüber hinaus gelten die folgenden Grundannahmen:

- Im Modell werden zwei Personengruppen betrachtet, Erwerbstätige mit Pkw und Erwerbstätige ohne Pkw. Die Erwerbstätigen ohne Pkw werden hierbei jedoch nicht als *Captive Rider* betrachtet, die alle motorisierten Wege mit dem ÖV zurücklegen müssen. Es wird vielmehr von einem eingeschränkten Pkw-Zugang ausgegangen, vorstellbar z.B. als weitere Person in einem Haushalt mit einem Pkw oder als Car-Sharing-Nutzer.
- Es soll ein einfaches Wegekettenmodell verwendet werden. Jeder Einwohner sorgt unabhängig von der Personengruppe für eine Wegekette Wohnen – Arbeiten – Wohnen und für 0,5 Wegeketten Wohnen – Sonstiges – Wohnen pro Tag.
- Als ÖV-Angebot dient beispielhaft ein Busnetz, das jedoch nicht von den auslastungsbedingten Verzögerungen im Straßennetz beeinflusst wird.
- Von den bei zunehmender Einwohnerzahl auslastungsbedingt ansteigenden Reisezeiten im MIV soll die Zielwahl bzw. Reiseweite nicht beeinflusst werden. Aus praktischen Überlegungen soll auch die Qualitätsverbesserung im ÖV nicht zu einer Änderung der Zielwahl führen, damit die Reiseweite konstant bleibt. Somit ist die Struktur der Gesamtnachfragematrix stets gleich.
- Jeder Verkehrszelle soll fest eine ÖV-Haltestelle zugeordnet werden. Fußwege zu anderen Haltestellen sind nicht möglich, auch wenn dadurch insgesamt attraktivere Verbindungen entstehen würden.
- Zellbinnenverkehr soll nicht betrachtet werden. Es wird angenommen, dass dieser stets unmotorisiert stattfindet und dass er in den betrachteten Erzeugungsraten nicht berücksichtigt ist.

- Es werden keine ÖV-Zeitkarten modelliert. Es wird kein Parkwiderstand modelliert. Es erfolgt keine vom Verkehrsangebot bzw. der Verkehrssituation abhängige Fahrzeugbeschaffungswahl.

4.2 Ausgangspunkt

Als Ausgangspunkt dient ein rasterförmiges Stadtmodell, das bereits in einigen Untersuchungen zur algorithmischen Optimierung von ÖV-Netzen mit LINTIM [14], insbesondere in [15], verwendet wurde. In diesem besteht die Stadt aus einem Raster von 5×5 Verkehrszellen und einem entsprechenden gitterförmigen Straßennetz. Auch die in den Grundannahmen beschriebene Grundstruktur des Nachfragemodells mit Personengruppen, Wegezwecken, Wegeketten und Modi ist darin bereits angelegt.

Dieses Modell wurde an die Anforderungen für die durchgeführten Untersuchungen angepasst. Dabei wurden einige Aspekte unverändert übernommen, andere leicht abgeändert oder neu entwickelt. Als Modellierungssoftware wurde zur Bearbeitung und für alle Modellrechnungen VISUM 21 genutzt.

Da die Untersuchungen an einem *fiktiven abstrakten Beispielmmodell* stattfinden, sind alle Ergebnisse direkte Auswirkungen aus den gewählten Eingangsgrößen, Funktionen und Parametern. Anders als bei der beispielhaften Betrachtung einer realen Region kann das Modell nicht an Erhebungsdaten kalibriert werden. Darum sind zum einen die gewonnenen Erkenntnisse mehr qualitativ als quantitativ zu verstehen, zum anderen wird die möglichst umfassende Dokumentation aller Einstellungen, Modellparameter und Annahmen als besonders wichtig erachtet.

4.3 Personengruppen und Erzeugungsmodell

Die Gesamtbevölkerung verteilt sich zu 70 % auf die Personengruppe Erwerbstätige mit Pkw (EwC – *Employees with Car*) und zu 30 % auf die Personengruppe Erwerbstätige ohne Pkw bzw. mit eingeschränkter Pkw-Verfügbarkeit (EwoC – *Employees without Car*). Betrachtet werden neben Wohnen (*Home H*) zwei Aktivitäten: Arbeiten (*Work W*) und Sonstiges (*Other O*). Verwendet wird ein Wegekettenmodell vom Typ VISEM. Darin sind lediglich die Wegeketten HWH und HOH vorgesehen. Für beide Personengruppen gelten die Erzeugungsraten von 1 für die Wegekette HWH und 0,5 für HOH. Für alle vier Aktivitätenpaare (HW, WH, HO, und OH) sind Ganglinien hinterlegt, die im Anhang C.2 dokumentiert sind. Die sich ergebende relative Ganglinie der Gesamtnachfrage ist

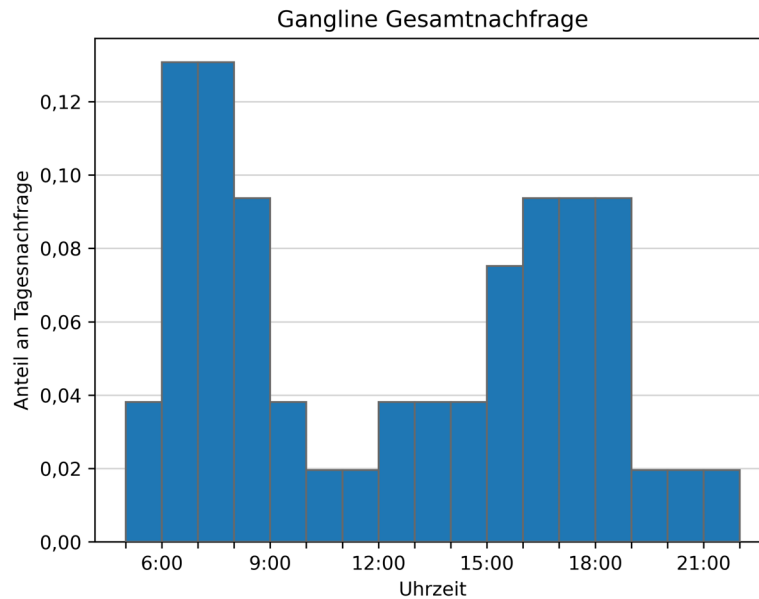


Abbildung 4.1: Relative Tagesganglinie der Verkehrsnachfrage. Die Ganglinie bezieht sich auf die Wunsch-Abfahrtszeiten.

in Abbildung 4.1 gezeigt. Da nur zweigliedrige Wegekettens¹ verwendet werden, sind die sich ergebenden Nachfragematrizen für den Gesamttag stets symmetrisch.

4.4 Netzmodell

4.4.1 Strukturdaten

Das Modell enthält 25 Verkehrszellen, die in einem 5×5 -Raster mit einem Abstand von 2 km zwischen benachbarten Zellen angeordnet sind. Die Zellen werden mit dreistelligen Nummern bezeichnet, wobei die mittlere Ziffer stets 0 ist, die erste Ziffer die „Zeile“ und die letzte Ziffer die „Spalte“ angibt.

Die Einwohner verteilen sich nicht gleichmäßig auf die Stadt, sondern werden anhand von vorgegebenen Verteilungsgewichten auf die Verkehrszellen verteilt. Das Verhältnis der beiden Personengruppen ist jedoch in allen Verkehrszellen gleich. Die Strukturgrößen zu Arbeit und Sonstigem werden in gleicher Weise anhand jeweils eigener Verteilungsgewichte verteilt. So werden Bereiche mit unterschiedlichen Nutzungen und unterschiedlicher Bebauungscharakteristik innerhalb der Stadt nachgebildet. Die Verteilungsgewichte wurden unverändert aus den elektronischen Unterlagen zu [15] übernommen. Sie sind detailliert im Anhang C.1 dokumentiert und die sich ergebende Verteilung in

¹ Drei Aktivitäten – zwei Aktivitätenübergänge (Wege)

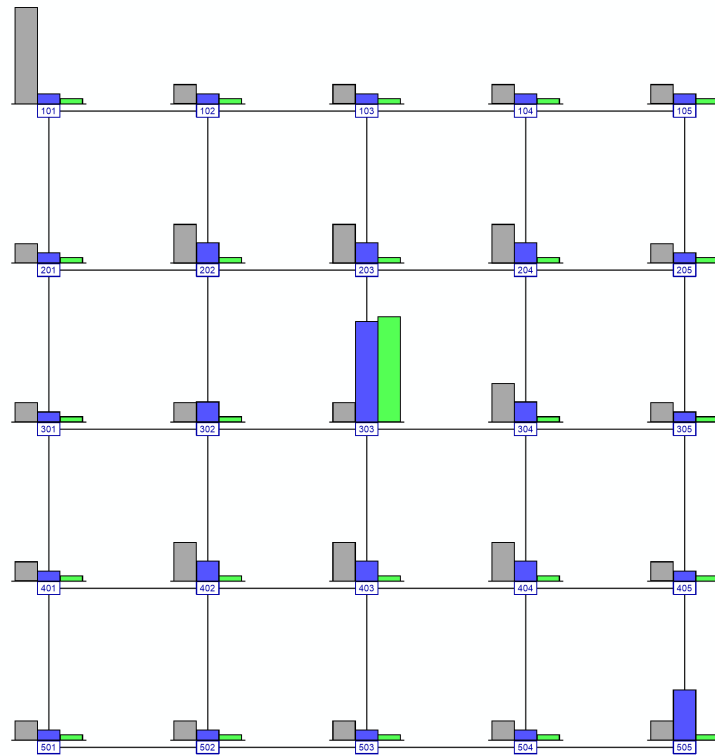


Abbildung 4.2: Übersicht der Strukturdaten Einwohnerzahl (grau), Arbeitsplätze (blau) und Sonstiges (grün) für die Verkehrszellen im VISUM-Modell. Die Skalierung zueinander ist so gewählt, dass die gleiche Fläche der gleichen Anzahl an erzeugten Wegen mit dieser Zielaktivität entspricht.

Abbildung 4.2 visualisiert. So bildet z.B. die Zelle 101 im Nordwesten einen starken Einwohnerschwerpunkt, während die zentrale Zelle 303 bei den Strukturgrößen für Arbeit und insbesondere Sonstiges deutlich heraussticht. Die Zelle 505 im Südosten bildet einen weiteren Arbeitsplatzschwerpunkt, und bei den Zellen in „inneren Ring“ um die zentrale Zelle herum sind sowohl die Wohn- als auch die Arbeitsplätze gegenüber den (übrigen) äußeren Zellen erhöht.

Die absolute Anzahl der Einwohner wird in den Modellläufen variiert. Die absoluten Werte der Strukturgrößen für Arbeit und Sonstiges sind in der verwendeten Modellkonfiguration in VISUM irrelevant, da als *Zielpotentiale* nur deren relative Anteile für die Verkehrsverteilung ausschlaggebend sind.

4.4.2 Straßennetz

Die rasterförmig angeordneten Verkehrszellen sind durch ein gitterförmiges Straßennetz mit Achsabstand von 2 km verbunden (siehe Abbildung 4.3). Dieses gliedert sich in drei

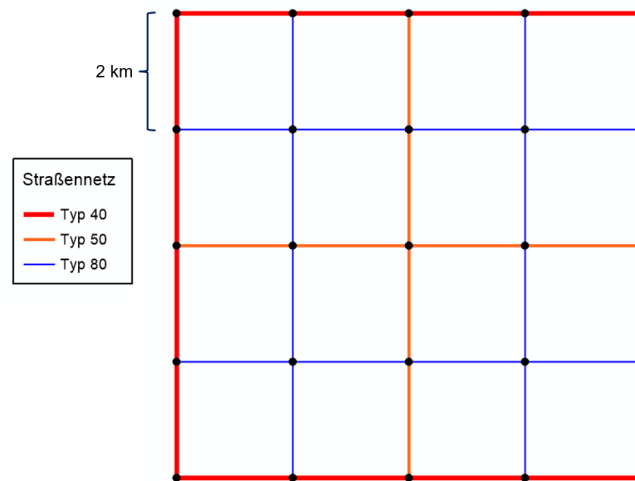


Abbildung 4.3: Im VISUM-Modell hinterlegtes Straßennetz mit Gliederung in Streckentypen.

Tabelle 4.1: Im Straßennetz verwendete Streckentypen.

Typ	Verwendung	v_0 IV in km/h	Kapazität IV in Fzg/d	mittl. Geschw. Bus in km/h	externe Vorauslastung
40	Außenring	50	20 000	20	30 %
50	Hauptachsen	50	16 000	20	10 %
80	Nebenachsen	30	8 000	20	0 %

Streckentypen unterschiedlicher Leistungsfähigkeit, deren Eigenschaften in Tabelle 4.1 dargestellt sind. Alle Strecken sind für Pkw und Bus geöffnet und für den Fußverkehr geschlossen.

Die Strecken der Typen 40 und 50 erhalten als Straßen des übergeordneten Netzes eine Vorbelastung, die extern verursachten Verkehr auf diesen Straßen darstellen soll. Die Vorbelastung ergibt sich aus einem bestimmten Prozentsatz der Streckenkapazität, der ebenfalls aus Tabelle 4.1 hervorgeht. Die Vorbelastung ist unabhängig von der Einwohnerzahl bzw. der internen MIV-Nachfrage konstant und sowohl bei der Zielwahl als auch bei der Umlegung wirksam.

Die modellierte Netzdichte mit dem Achsabstand von 2 km bzw. einer Straßendichte von $0,8 \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$ wird als eigentlich deutlich zu gering angesehen, um ein städtisches Netz zu repräsentieren. Da die Struktur dieses übernommenen Netzes jedoch erhalten bleiben sollte, wurden die ursprünglich nach groben verkehrstechnischen Überlegungen festgelegten Kapazitäten verdoppelt. Eine Strecke im VISUM-Modell soll somit mehrere Straßen im städtischen Netz repräsentieren.

Den ursprünglichen Überlegungen nach sollte der Typ 50 auf den Hauptachsen einer

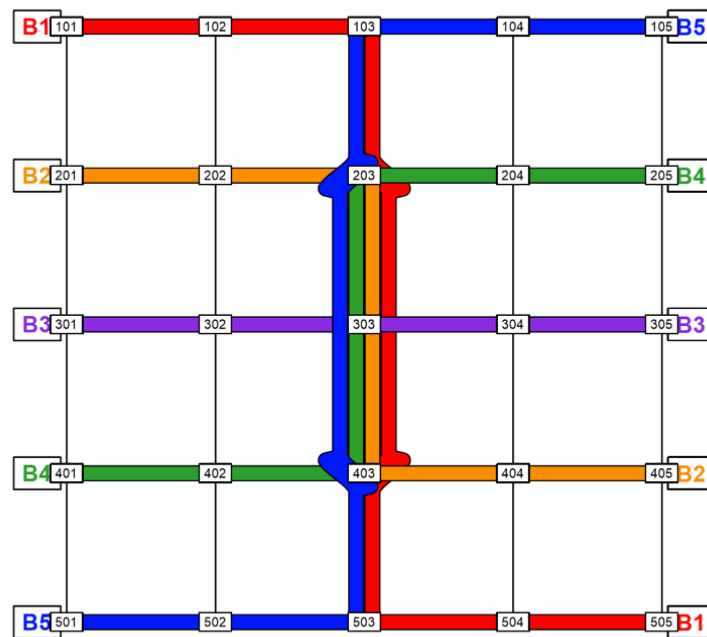


Abbildung 4.4: Das verwendete ÖV-Liniennetz mit fünf Linien.

je Richtung einstreifigen Straße entsprechen, die im Bereich von Lichtsignalanlagen auf zwei Fahrstreifen aufgeweitet wird. Damit ergäbe sich eine Stundenkapazität von ca. $800 \frac{F_{zg}}{h}$ bzw. einer Tageskapazität von ca. $8000 \frac{F_{zg}}{d}$. Die Nebenachsen vom Typ 80 sollten als Straßen ohne Aufweitung im Bereich von Lichtsignalanlagen eine Kapazität von $4000 \frac{F_{zg}}{d}$ erhalten. Die schließlich verwendeten Werte finden sich in Tabelle 4.1.

An den Kreuzungen kommt zusätzlich zu den Fahrzeiten auf den Strecken je nach Kombination der zuvor und danach benutzten Strecke eine Abbiegezeit hinzu, die an allen Kreuzungen für Geradeausfahrer und Rechtsabbieger 30 s und für Linksabbieger 1 min beträgt. (Die unterschiedlichen Abbiegezeiten führen dazu, dass bei symmetrischer Nachfrage die Netzbelastungen nicht symmetrisch sind). Für die Anbindungen, den Weg aus der Verkehrszelle ins modellierte Straßennetz bzw. umgekehrt, wurde für alle Verkehrszellen eine benötigte Fahrzeit von 3 min und eine zusätzliche Fahrweite von 250 m hinterlegt.

4.4.3 ÖV-Netz

Das ÖV-Liniennetz besteht aus fünf Linien und ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Es basiert auf einem in [15] vorgestellten Liniennetz mit der Bezeichnung „P1“, gegenüber dem jedoch eine reine Verstärkerlinie, die nur auf einer Teilstrecke entlang dem Verlauf

der Linie 1 verkehrte, gestrichen wurde, um die automatisierte Fahrplananpassung zu vereinfachen. Der Grundfahrplan und damit die relativen Taktlagen der Linien wurde unverändert von [15] übernommen, sie sind im Anhang in Tabelle C.3 dokumentiert. Der Takt auf den Linien wird je nach Untersuchung geändert und dabei explizit angegeben. Das Liniennetz hat außerdem die folgenden Eigenschaften:

- Es ist baumförmig, das heißt es gibt keine geschlossenen Maschen und somit zwischen zwei Punkten keine räumlich verschiedenen Alternativrouten.
- Alle Linien bedienen die zentrale Haltestelle an der Zelle 303, das heißt auf allen Relationen ist eine Verbindung mit höchstens einmaligem Umstieg möglich.
- Es gibt Bereiche, in denen sich mehrere Linien überlagern, das heißt auch bei gleichem Takt auf allen Linien ist die Bedienungshäufigkeit nicht für alle Relationen gleich.

Die Busse verkehren mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von $20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und benötigen somit zwischen zwei modellierten Haltestellen 6 Minuten. (Die niedrige Geschwindigkeit kann auch als Ergebnis von tatsächlich enger liegenden, aber nicht modellierten zusätzlichen Haltestellen interpretiert werden.) Der Fahrplan ist ohne Haltezeiten modelliert.

Die an den Anbindungen festgelegte notwendige Gehzeit zwischen Haltestelle und Verkehrszelle beträgt bei allen Verkehrszellen 6 Minuten. Zum Umstieg besteht an allen Haltestellen und zwischen allen Linien eine Mindestumsteigezeit (in VISUM: Umsteigezeit) von 3 Minuten.

4.5 Ziel- und Moduswahl

4.5.1 Anforderungen an die Moduswahl

Für die vorgesehenen Modellzwecke müssen die folgenden Aspekte in den Nutzen für die Moduswahl einfließen:

- die Reisezeit,
- die Kosten,
- beim ÖV die Umsteigehäufigkeit,
- beim ÖV die Fahrtenhäufigkeit,
- eine personengruppenspezifische Moduspräferenz.

4.5.2 Anforderungen an die Zielwahl

Die Zielwahl soll mithilfe der *Logsum*-Funktion in der simultanen VISEM Verkehrsverteilung und -aufteilung anhand der auch für die Moduswahl verwendeten Nutzendefinition geschehen. Jedoch soll sich die Zielwahl bei zunehmenden Verkehrsstärken und somit Reisezeiten nicht verändern, weshalb mit einer fixierten Zielwahl gearbeitet wird.

Die Zielwahl erfolgt daher ohne Rückkopplung in einem Netz mit nur der externen Belastung als IV-Belastung und einem Referenz-ÖV-Angebot, in dem alle Linien im 20'-Takt verkehren. Die dabei im Zuge der Zielwahl berechnete Nutzenmatrix wird gespeichert und in den späteren Modellläufen als Nutzen für die Zielwahl verwendet. Dadurch erhält die Gesamtnachfragematrix immer die selbe Struktur. Durch die explizite Verwendung der gespeicherten Zielwahlmatrix wird die in VISEM vorgesehene hierarchische Koppelung aufgebrochen und Zielwahl und Moduswahl entkoppelt, aber dennoch in einem Verfahrensschritt gemeinsam berechnet.

Zudem soll kein Zellbinnenverkehr modelliert werden, dieser also möglichst bei der Zielwahl ausgeschlossen werden. Vor dem Zielwahlverfahren zur Ermittlung der konstanten Nutzenmatrix werden daher alle für die Zielwahl relevanten Widerstandsmatrizen zu diesem Zweck angepasst. Dafür wird auf die Diagonaleinträge das zwanzigfache des zuvor größten Matrixelements geschrieben.

4.5.3 Wahlmodell

Für Moduswahl und Zielwahl wird jeweils ein Logit-Modell verwendet. Bei der Nutzenermittlung wird differenziert nach Personengruppen, jedoch nicht nach Wegezwecken.

Im ÖV werden die Reisezeit und die Umsteigehäufigkeit durch die Verwendung einer empfundenen Reisezeit zusammengefasst:

$$t^{\text{PJT}} = t^{\text{JT}} + n^{\text{Tr}} \cdot 5 \text{ min} . \quad (4.1)$$

Die Berücksichtigung der Fahrtenhäufigkeit erfolgt mittels der *Startwartezeit* t^{OWT} .

Da im Logit-Modell nur die Differenzen der Nutzen ausschlaggebend sind, genügt es, die modusspezifische Konstante nur auf Seite des Modus IV zu berücksichtigen. Mit ihr wird auch die Differenzierung nach Personengruppen realisiert. Die Nutzenfunktionen für die beiden Modi lauten:

$$U_{\text{PrT}}^{\text{PG}} = \beta_{\text{time}} \cdot t_{\text{PrT}}^{\text{JT}} + \beta_{\text{cost}} \cdot c_{\text{PrT}} + C_{\text{PrT}}^{\text{mode,PG}} , \quad (4.2)$$

$$U_{\text{PuT}}^{\text{PG}} = \beta_{\text{time}} \cdot t_{\text{PuT}}^{\text{PJT}} + \beta_{\text{cost}} \cdot c_{\text{PuT}} + \beta_{\text{owt}} \cdot t_{\text{PuT}}^{\text{OWT}} . \quad (4.3)$$

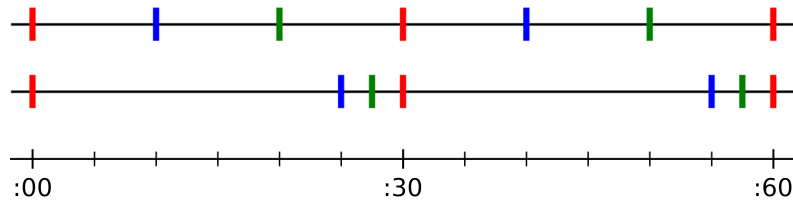


Abbildung 4.5: Überlagerung von drei Linien nach der „Stammstrecken-Idee“, also in ihrem Takt koordiniert (oben) sowie Zulauf auf eine Rendez-Vous-Haltestelle (unten). Im oberen Fall beträgt die durchschnittliche Startwartezeit ein Drittel im Vergleich zum Fall mit nur einer Linie, während sie sich im unteren Fall mehr als zwei Drittel beträgt. Eigene Darstellung.

Der in VISUM zusätzlich vorgesehene Skalierungsparameter c des Logit-Modells wird überall auf 1 gesetzt. Die Skalierung erfolgt ausschließlich mit den in der Nutzenfunktion genannten β -Parametern.

4.5.4 Startwartezeit im ÖV

Die Startwartezeit t^{OWT} ist die durchschnittliche Zeit, die auf eine geeignete Verbindung gewartet werden muss, wenn man ohne Information über den Fahrplan zu einer Haltestelle geht. Sie ergibt sich bei einem regelmäßigen Takt als die Hälfte der Fahrtenfolgezeit:

$$t^{\text{OWT}} = \frac{1}{2} t^{\text{headway}}. \quad (4.4)$$

In VISUM wird t^{OWT} so berechnet, dass die Dauer des Umlegungszeitraums durch das doppelte der Anzahl der gefundenen Verbindungen geteilt wird:

$$t^{\text{OWT}} = \frac{1}{2} \frac{T^{\text{Umlegung}}}{N^{\text{Fahrten}}}. \quad (4.5)$$

Dies kann zu Abweichungen von der eigentlichen Definition führen: Zum einen ist diese Berechnung sensitiv auf die genaue Dauer des Umlegungszeitraums und darauf, nach welcher genauen Regel Verbindungen am Rand desselben noch berücksichtigt werden oder nicht. Außerdem kann der Wert bei der Überlagerung von mehreren Linien zu einer Abweichung von der tatsächlichen Situation für die Verkehrsteilnehmer führen, wie das Beispiel in Abbildung 4.5 zeigt: Sind die zeitlichen Abstände zwischen den Fahrten mehrerer Linien gleichmäßig, so stimmt der berechnete Wert. Folgen die Fahrten sich hingegen dicht, während zu anderen Zeiten eine größere Pause entsteht, wird die durchschnittliche Wartezeit unterschätzt.

Im betrachteten Modell soll nicht unterstellt werden, dass die Fahrgäste über kei-

ne Information zu den Abfahrtzeiten verfügen. Die Startwartezeit wird hier als ein Maß für die *Anpassungszeit* interpretiert, die angibt, wie weit vom gewünschten Abfahrtszeitpunkt abgewichen werden muss. Bei gleichmäßig kontinuierlich verteilten Abfahrtszeitwünschen, regelmäßigem Takt und Wahl der zeitlich nächstgelegenen Verbindungen (unabhängig ob früher oder später) entspricht diese Anpassungszeit der Hälfte der Startwartezeit t^{OWT} .

In VISUM kann eine Anpassungszeit zwar berechnet werden, diese ist aber von weiteren Umlegungseinstellungen, der zeitlichen Verteilung der Nachfrage sowie dem Verbindungswahlmodell abhängig. Diese Eigenschaften sind nicht gewünscht, weshalb für die Nutzenfunktion in Ziel- und Moduswahl die Startwartezeit verwendet wird.

4.5.5 Kostensätze

Bei den Kosten wird auf die Verwendung des VISUM-Tarifmodells für den ÖV verzichtet. Für beide Modi werden die Nutzerkosten durch eine Kostenmatrix dargestellt. Das hat den Vorteil, dass der Tarif einfacher über ein externes Skript geändert werden kann.

Der ÖV-Tarif setzt sich aus einem Basisanteil und einem luftlinienentfernungsabhängigen Anteil zusammen:

$$c_{\text{PuT}} = \text{PuTFareBase} + \text{PuTFareKm} \cdot l^{\text{DD}}, \quad (4.6)$$

wobei als Tarif festgelegt wurde:

$$\text{PuTFareBase} = 1,00 \text{ €}, \quad \text{PuTFareKm} = 0,15 \frac{\text{€}}{\text{km}}. \quad (4.7)$$

Für bestimmte Untersuchungen wird auch ein geänderter Tarif verwendet. Dies geht klar aus den Untersuchungsbezeichnungen und den zugehörigen Erläuterungen hervor. Die hier festgelegten Fahrpreise werden in Abgrenzung dazu gelegentlich als „Standardtarif“ bezeichnet.

Für den MIV werden nur die sichtbaren Kosten betrachtet. Diese ergeben sich überschlägig aus einem durchschnittlichen Benzinpreis von $1,87 \frac{\text{€}}{\text{L}}$ [16] und einem Durchschnittsverbrauch von $7,4 \frac{\text{L}}{100 \text{ km}}$ [17] zu $0,14 \frac{\text{€}}{\text{km}}$. Anders als beim ÖV wird hier jedoch die tatsächlich zurückzulegende Distanz zugrunde gelegt:

$$c_{\text{PrT}} = \text{PrTCostBase} + \text{PrTCostKm} \cdot l^{\text{IVD}}, \quad (4.8)$$

wobei gilt:

$$\text{PrTCostBase} = 0, \quad \text{PrTCostKm} = 0,14 \frac{\text{€}}{\text{km}}. \quad (4.9)$$

4.5.6 Bewertungsparameter

Das Verhältnis der β -Parameter für die Kosten und für die Reisezeit ergibt sich durch Setzung eines *Value of Time*. Werden als solcher $10 \frac{\text{€}}{\text{h}}$ angesetzt, ergibt sich (da die Zeiten in die Nutzenfunktion in Minuten eingesetzt werden sollen):

$$10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = \frac{\beta_{\text{time}}}{\beta_{\text{cost}}} \quad \Rightarrow \quad \frac{\beta_{\text{cost}}}{\text{€}^{-1}} = 6 \cdot \frac{\beta_{\text{time}}}{\text{min}^{-1}}. \quad (4.10)$$

Der Einfachheit halber wird davon ausgegangen, dass außerdem gilt:

$$\beta_{\text{time}} = \beta_{\text{owt}}. \quad (4.11)$$

Mit diesem festgesetzten Verhältnis der β -Parameter wurden diese gemeinsam variiert und die Auswirkungen auf den aufkommensbezogenen Modal Split und die Reiseweite je Weg im Netz untersucht. In Abhängigkeit von einer Variationsgröße β wurden also die Bewertungsparameter wie folgt gesetzt:

$$\beta_{\text{time}} = 1 \cdot \beta \cdot \text{min}^{-1}, \quad \beta_{\text{owt}} = 1 \cdot \beta \cdot \text{min}^{-1}, \quad \beta_{\text{cost}} = 6 \cdot \beta \cdot \text{€}^{-1}, \quad (4.12)$$

und die Ergebnisse in Abbildung 4.6 dargestellt. In Anlehnung an bestehende Modelle am Institut wurde $\beta = -0,05$ gewählt. Die dafür erhaltenen Werte in Abbildung 4.6 erscheinen sinnvoll.

$$\beta_{\text{time}} = -0,05 \text{ min}^{-1}, \quad \beta_{\text{owt}} = -0,05 \text{ min}^{-1}, \quad \beta_{\text{cost}} = -0,30 \text{ €}^{-1}. \quad (4.13)$$

4.5.7 Modusspezifische Konstante

Der konstante modusspezifische Nutzenbeitrag modelliert Präferenzen für bestimmte Verkehrsmittel/modi, die unabhängig von den messbaren Kosten- und Zeitaufwänden bestehen. Im verwendeten Modell gehen diese nur in die Nutzenfunktion des Modus IV ein, da beim verwendeten Logit-Modell nur die Differenz entscheidend ist. Über diese modusspezifische Konstante wird im verwendeten Modell auch das unterschiedliche Verhalten der beiden Personengruppen modelliert. Zur Festlegung der modusspezifischen Konstante wurden einige Konfigurationen von Takt und Einwohnerzahl in unterschiedlichen Kombinationen der modusspezifischen Konstanten für die beiden Personengruppen betrachtet. Dabei wurde der Modal Split insgesamt und für die jeweiligen Personengruppen beobachtet. In Ermangelung von empirischen Daten über den Mo-

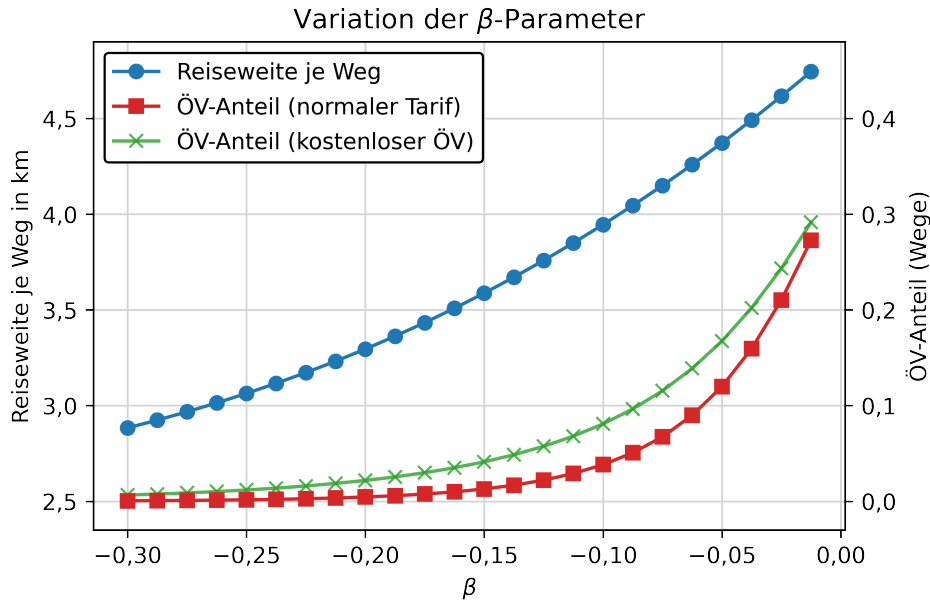


Abbildung 4.6: Untersuchung der Auswirkung des Variationsparameters β auf die Reiseweite und den Modal Split sowie den Einfluss von kostenlosem ÖV auf den Modal Split. Eine Variation von β entspricht der gleichzeitigen Änderung aller Skalierungsparameter in der Nutzenfunktion für Ziel- und Moduswahl.

dellraum wurden schließlich Parameter ausgewählt, für die die Entwicklung des Modal Split mit Takt und Einwohnerzahl als „plausibel und realistisch“ angesehen wurde. Für die modusspezifischen Konstanten wurde festgelegt:

$$C_{PrT}^{mode, EwC} = 1,5, \quad C_{PrT}^{mode, EwoC} = -1,0. \quad (4.14)$$

4.6 IV-Umlegungsverfahren

Im MIV wird die gesamte Nachfrage eines Tages als Tagesumlegung betrachtet. Dazu wird eine statische Gleichgewichtsumlegung verwendet. Die Nachfrage liegt auch für den Modus IV (PrT) als Matrixganglinie mit einer eigenen Matrix für jede Stunde vor. Ein Umbau des Modells auf eine Stundenumlegung ist also prinzipiell möglich.

Als CR-Funktion für Strecken wurde die LOHSE-Funktion gewählt (vgl. Gleichung 3.3), da diese empfohlen wird, wenn auch der Überlast-Bereich betrachtet werden soll [3, S. 382]. Für dieses Modell wurden die Parameter folgendermaßen gewählt:

$$a = 1, \quad b = 4, \quad c = 1, \quad sat_{crit} = 1,3, \quad (4.15)$$

wobei c ein zusätzlicher Parameter in der VISUM-Implementierung ist, der eine Skalierung der Kapazität q_{\max} erlaubt. Die LOHSE-Funktion mit dieser Parametrisierung ist in Abbildung 3.2 in Kapitel 3 gezeigt. Die benötigte Zeit für Anbindungen und Abbieger bleibt konstant, hierfür wurde also keine CR-Funktion definiert. Die hier entstehenden zusätzlichen Verlustzeiten werden als durch die CR-Funktion der Strecken bereits mitberücksichtigt angenommen.

4.7 ÖV-Umlegungsverfahren

Zur ÖV-Umlegung und Kenngrößenberechnung wird das fahrplanfeine Verfahren genutzt. Der Umlegungszeitraum ist von 05:00 bis 22:00 festgelegt, hat also eine Länge von 17 Stunden. Der Vorlauf ist auf null Stunden, der Nachlauf auf zwei Stunden eingestellt, Verbindungen die vollständig im Nachlauf liegen werden aus der Berechnung ausgeschlossen.

Die Nachfragematrizen liegen stundenweise vor, die zeitliche Verteilung gemäß der Ganglinie bezieht sich auf die Startzeit an der Startzelle. Es wird eine Option des Umlegungsverfahrens genutzt, um die Nachfrage innerhalb einer Stunde gleichmäßig auf feinere Intervalle von je einer Minute zu verteilen („aufzurastern“). Außerdem ist eine Option aktiviert, dass auch Abfahrtszeiten außerhalb des Wunschintervalls (von jetzt 1 min Länge) in Betracht gezogen werden, auch wenn es eine Verbindung mit Abfahrtszeit in diesem Intervall gibt. Eine weiche Kapazitätsschranke wird nicht verwendet.

Der Widerstand zur Verbindungswahl setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$w = t^{\text{PJT}} + \Delta t^{\pm}. \quad (4.16)$$

Dabei ist t^{PJT} die empfundene Reisezeit und Δt^{\pm} die Anpassungszeit, also die Zeitdifferenz zwischen der tatsächlichen Abfahrtszeit einer außerhalb des Wunschabfahrtszeitintervalls startenden Verbindung und der näheren Intervallgrenze. Für Abfahrtszeiten innerhalb des Wunschabfahrtszeitintervalls gilt $\Delta t^{\pm} = 0$. Die empfundene Reisezeit setzt sich zusammen aus der Reisezeit und einer zusätzlichen „Bestrafung“ jedes Umsteigevorgangs mit 5 Minuten. Die Reisezeit setzt sich zusammen aus der Fahrzeit im Fahrzeug, der Zugangszeit, der Abgangszeit, der Umsteigegezeit (oder Mindestumsteigezeit) und der Umsteigewartezeit.

$$\begin{aligned} t^{\text{PJT}} &= t^{\text{IVT}} + t^{\text{AT}} + t^{\text{ET}} + t^{\text{WT}} + t^{\text{TWT}} + n^{\text{Tr}} \cdot 5 \text{ min} \\ &= t^{\text{JT}} + n^{\text{Tr}} \cdot 5 \text{ min} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Zur Verbindungswahl wird ein Logit-Modell verwendet, mit der Transformation:

$$e^{-0,1 w} . \quad (4.18)$$

4.8 ÖV-Betreibermodell

Die Definition des ÖV-Fahrzeugs *Bus* mit seiner Platzanzahl und seinen Kostensätzen wurde aus den elektronischen Unterlagen zu [15] übernommen. Bei der Kapazität wird nicht zwischen Sitzplätzen und Gesamtplätzen unterschieden. Ein Bus bietet im verwendeten Modell 70 Gesamtplätze.

Die Kostensätze für den ÖV-Betrieb sind 25 € pro Einsatzstunde (einschließlich der Wartezeiten auf die Folgefahrt) und 1,50 € pro Einsatzkilometer. Zusätzlich fallen 200 € pro Tag für jedes benötigte Fahrzeug an. Weitere Kosten des Betreibers werden nicht betrachtet. Eine linienfeine Kosten- und Einnahmenrechnung ist mit dem gewählten Tarifmodell als einfache Fahrpreismatrix nicht möglich.

4.9 Verfahrensablauf und Rückkopplung

Es wird ein rückgekoppeltes Modell verwendet, das heißt mit den sich aus der Umlegung ergebenden neuen Kenngrößen wird eine neue Moduswahl gerechnet, bis die Änderungen „gering“ sind. Das Standardverfahren des Modells ist in Abbildung 4.7b dargestellt. Als Konvergenzkriterium wird die Änderung aller Matrixelemente der IV-Nachfragematrix C betrachtet:

$$\frac{\sum_{i,j} |C_{ij}^{\text{neu}} - C_{ij}^{\text{alt}}|}{\sum_{i,j} C_{ij}^{\text{neu}}} \leq 0,001 \quad (4.19)$$

In der Rückkopplung wird die IV-Reisezeitmatrix für die Verwendung in der Moduswahl nach der *Method of Successive Averages* gedämpft.

Abbildung 4.7a zeigt das separat auszuführende Verfahren, in dem die Nutzenmatrix der Zielwahl berechnet wird. Hierbei wird keine Rückkopplung verwendet.

4.10 Automatisierter Modellaufbau

Das Grundmodell wird aufgeteilt in nach inhaltlichen Kriterien getrennte „Bausteine“ vorgehalten, die in den menschenlesbaren und manuell editierbaren VISUM-Dateiformaten .net und .dmd vorliegen.

Durch ein Python-Skript in Verbindung mit einer „Bauplandatei“, die angibt, welche Dateien in welcher Reihenfolge geladen werden sollen, werden diese zu einer VISUM-Versionsdatei zusammengesetzt. Dies hat mehrere Vorteile: Zum einen kann jederzeit ein sauberer, vorab definierter Modellzustand wieder hergestellt werden. Zu einmaligen Testzwecken angelegte Attribute, Matrizen oder Verfahren oder unwesentlich erscheinende Änderungen an Werten oder Verfahren sammeln sich so nicht im Modell an.

Darüber hinaus wird so eine stets einheitliche Grundlage für mehrere Modellvarianten ermöglicht. Es ist zum Beispiel möglich, ein einheitliches „Basismodell“ mit mehreren ÖV-Angeboten und mehreren Verfahrensabläufen oder Parametersätzen zu kombinieren. Änderungen am „Basismodell“ müssen so nur einmal vorgenommen werden und werden bei allen gewünschten Versionen wirksam.

Die verwendete Aufteilung des VISUM-Modells in die unterschiedlichen Dateien ist im Anhang D.1 dokumentiert.

4.11 Netzweite Aggregation von Kenngrößen

Um auf Relationsebene (also meist in Form von Matrizen) vorliegende Kenngrößen netzweit zu aggregieren, kann nicht einfach der Mittelwert aller Werte genommen werden, da dies die Werte verzerren würde: Eine Relation mit sehr geringer Nachfrage (also eine „unbedeutende Relation“) würde genau gleich in die Berechnung eingehen wie eine sehr stark nachgefragte Relation. Außerdem würde das Ergebnis direkt von der Zahl und dem Zuschnitt der Verkehrszellen abhängen: Der Einfluss einer schlecht angebundenen Zelle ließe sich durch Aufspaltung einer gut angebundenen Zelle kompensieren.

Die Aggregation muss also gewichtet mit der Nachfrage stattfinden. Beim verwendeten Modell, bei dem Zellbinnenverkehr ausgeschlossen wird, werden somit auch die Auswirkungen der Diagonalelemente in den Matrizen, die nicht aus dem Modellzustand errechnet sondern gesetzt werden, abgefangen.

Bei modusspezifischen Kenngrößen stellt sich außerdem die Frage, mit welcher Nachfragematrix gewichtet werden soll. Bei der Verwendung der Nachfragematrix des entsprechenden Modus (*Gewichtung mit realisierter Nachfrage*), wird die tatsächlich realisierte Verkehrssituation abgebildet: Die so gewichteten Kenngrößen stellen also die tatsächlichen Durchschnittswerte dar, wie sie von den Autofahrern bzw. ÖV-Fahrgästen im Modell „erlebt werden“.

Bei der Verwendung der Gesamtnachfragematrix wird die Auswirkung der Moduswahl ausgeklammert (*Gewichtung mit potentieller Nachfrage*). Dies sagt eher aus, was die Verkehrssituation in einem Modus für die generellen Verkehrsbedürfnisse einer Region

bedeutet, ohne die auf unterschiedlichen Relationen unterschiedliche Moduswahl vorweg zu nehmen. Die so gewichteten Kenngrößen stellen die Situation für einen durchschnittlichen Modellbewohner dar, die ihn aufgrund der vorliegenden Verkehrssituation erwartet, wenn er sich für den jeweiligen Modus entscheidet.

Zur Bewertung der Verkehrsqualität in einem Netz sind die nach potentieller Nachfrage gewichteten Werte heranzuziehen, für volkswirtschaftlich relevante Aussagen (z.B. Zeitverlust) die nach realisierter Nachfrage gewichteten Werte.

Der Vergleich der anhand der unterschiedlichen Gewichtungen gewonnenen aggregierten Größen kann beim Verständnis des Modellverhaltens hilfreich sein. Darum wird in dieser Arbeit gelegentlich ein solcher Vergleich gezogen und die Ursachen der Unterschiede erläutert.

4.12 Modellweiterentwicklung

Gelegentlich wurden bei einer Auswertung Unzulänglichkeiten am Modell erkannt und in der Folge beispielsweise Zahlenwerte nochmal geändert, um das Modell besser an die Realität anzupassen. Dies wurde durch die in 4.10 beschriebene Datenhaltung erheblich erleichtert. Alle im Hauptteil gezeigten Untersuchungen beziehen sich auf den finalen Modellstand, wie er in diesem Kapitel beschrieben ist. Für einen früheren Modellstand, für den bereits ein großer Teil der Auswirkungen gerechnet wurde, werden die Änderungen und deren Auswirkungen im Anhang F beschrieben und diskutiert.

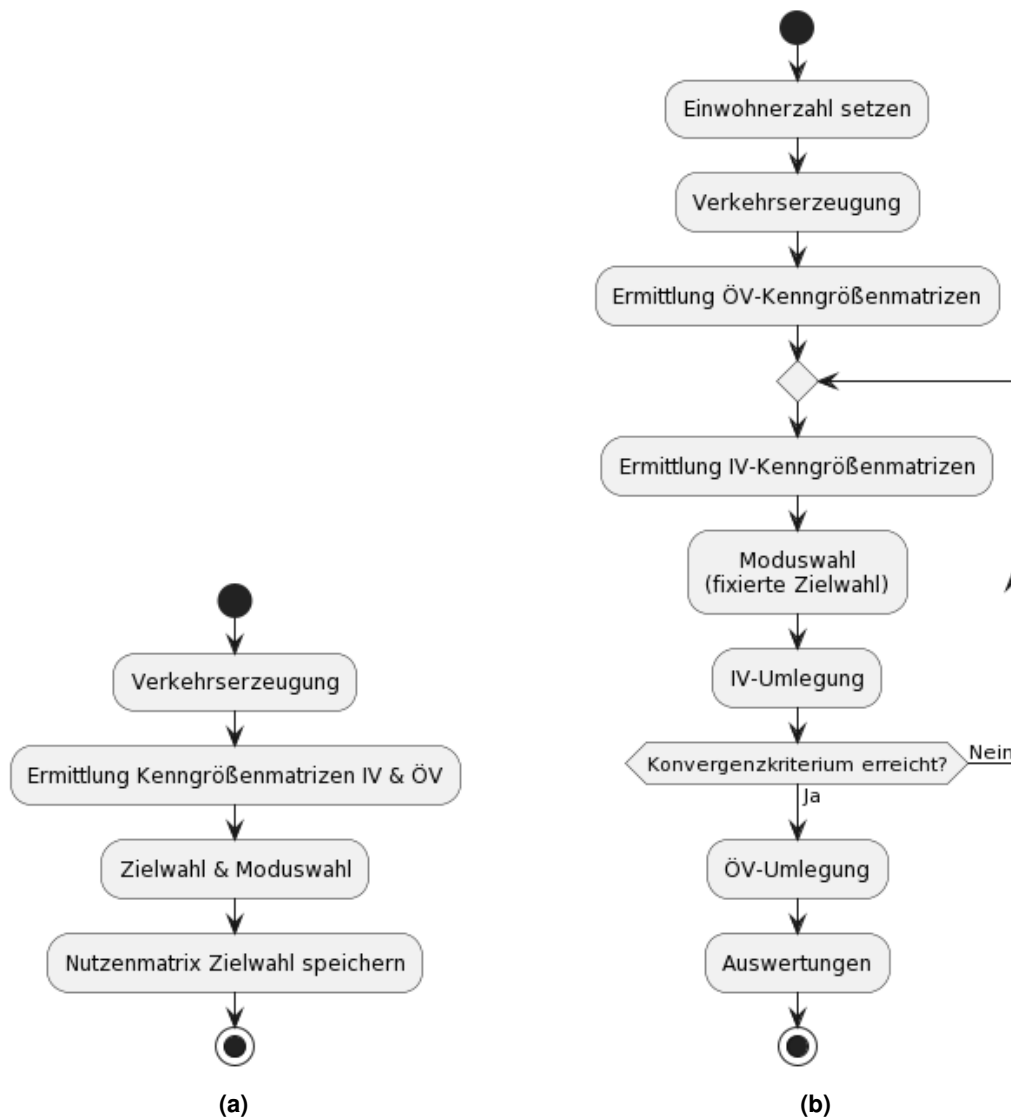


Abbildung 4.7: Verfahrensablauf der separaten Zielwahl (a) und des Standardverfahrens mit Rückkopplung und fixierter Zielwahl (b).

5 Untersuchung des Modellverhaltens ohne Angebotsanpassung

5.1 Idee der Untersuchung

Um ein möglichst gutes Verständnis des verwendeten Modells zu entwickeln, als Vergleichsfall sowie um zu überprüfen ob sich das Modell erwartungsgemäß verhält wurde das Modellverhalten zunächst ohne Kapazitätsanpassung untersucht. Dabei wird ein festes ÖV-Angebot angenommen und die Einwohnerzahl im Modellraum variiert, wobei die begrenzte Kapazität der ÖV-Fahrzeuge ignoriert wird. Die mit steigender Nachfrage durch die CR-Funktion ansteigenden IV-Reisezeiten werden hingegen berücksichtigt. Abbildung 5.1 zeigt, welche der in Abschnitt 2.5 vorgestellten Wirkungszusammenhänge in dieser Untersuchung berücksichtigt sind. Der Berechnungsablauf entspricht dem in Abbildung 4.7b vorgestellten Standardverfahren.

Diese Untersuchung wurde mit zwei Ausprägungen des ÖV-Angebots durchgeführt, einmal mit einem 60'-Takt und einmal mit einem 20'-Takt auf allen Linien. Zusätzlich wurde als weiterer Vergleichsfall eine weitere Untersuchung gänzlich ohne ÖV durchgeführt. In allen drei Varianten wurde mit einer Einwohnerzahl von 2000 begonnen und diese in Schritten von 2000 bis zu 400 000 Einwohnern erhöht.

Im Folgenden werden die wichtigsten Auswertungen für diese Experimente vorgestellt. Sie liefern zum Einen erste Erkenntnisse über den Einfluss der Einwohnerdichte

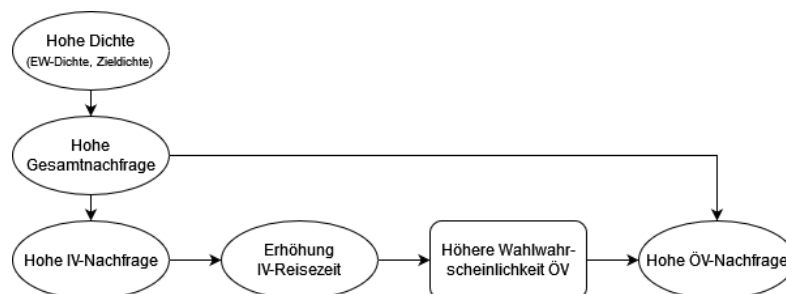


Abbildung 5.1: Wirkungszusammenhänge des Einflusses der Dichte auf den ÖV-Anteil, wie sie in der Modelluntersuchung ohne Angebotsanpassung berücksichtigt werden. Eigene Darstellung.

und des Verkehrsangebots auf die Moduswahl und die Verkehrssituation im Netz, zum Anderen verdeutlichen sie Charakteristika des gewählten Modells. Einige Auswertungen werden nur für die Version mit 20'-Takt gezeigt, andere vergleichen die Situationen mit den beiden unterschiedlichen ÖV-Angeboten.

5.2 Einführung in die Ergebnispräsentation

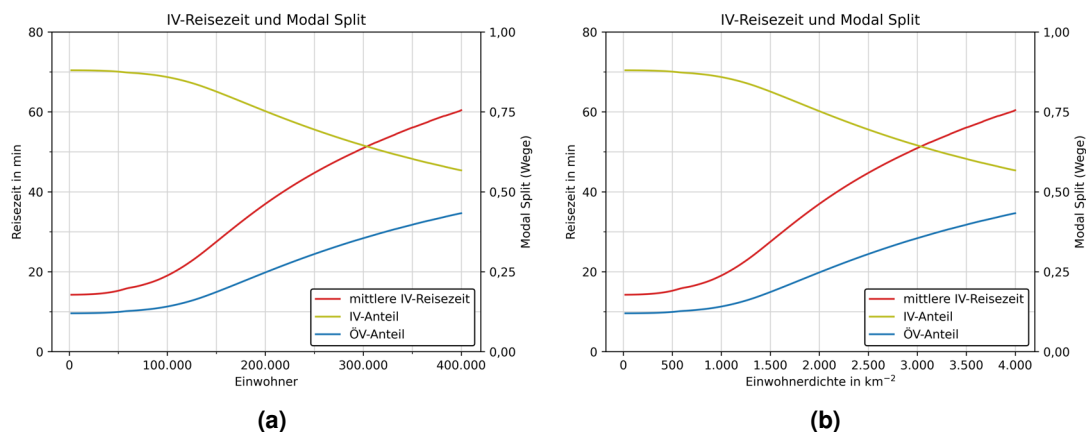


Abbildung 5.2: Veränderung der IV-Reisezeit und des Modal Split bei unterschiedlicher Einwohnerzahl/Einwohnerdichte im Modell, bei konstantem ÖV-Angebot mit 20'-Takt. Darstellung (a) nutzt die Einwohnerzahl als x-Achse, Darstellung (b) die Einwohnerdichte. Die Darstellungen sind äquivalent.

Abbildung 5.2 zeigt den Verlauf der Reisezeit im MIV¹ und den aufkommensbezogenen Modal Split (also Anteil an der Zahl der Wege) bei zunehmender Einwohnerzahl im Modellbereich. Da die Fläche des betrachteten Modellraums konstant ist, ändert sich damit auch die Einwohnerdichte im Modell, die in dieser Arbeit betrachtet werden soll. Da die Einwohnerzahl der Wert ist, der im Modell explizit gesetzt wird und daher *unmittelbar* zur Verfügung steht, werden im Folgenden die ermittelten Modellergebnisse stets in Abhängigkeit der Einwohnerzahl dargestellt, obwohl im Sinne der Ergebnisinterpretation meist die Einwohnerdichte gemeint ist. Abbildung 5.2 verdeutlicht, dass die Darstellungen äquivalent sind.

Da in diesem Modell nur eine bimodale Aufteilung stattfindet, stellen die beiden Kurven zum Modal Split den exakt gleichen Sachverhalt dar. Sie gehen durch Spiegelung an der 50 %-Marke auseinander hervor. Im Folgenden wird deshalb zur Untersuchung

¹ MIV-Reisezeiten gewichtet mit der Gesamtnachfragematrix.

des Modal Split stets nur der ÖV-Anteil aufgetragen, die Modal-Split-Information ist somit dennoch vollständig dargestellt.

Wie aus den Diagrammen in Abbildung 5.2 hervorgeht, steigt in Übereinstimmung mit den in Abschnitt 2.5 formulierten Erwartungen der ÖV-Anteil mit zunehmender Einwohnerdichte an. Dies liegt an der Zunahme der IV-Reisezeit im Straßennetz, die die Moduswahl beeinflusst und ihrerseits auf die zunehmende Auslastung der Straßen zurückzuführen ist. Detailliertere Betrachtungen werden im Folgenden vorgestellt.

5.3 Betrachtungen des Modal Split

Abbildung 5.3 vergleicht den aufkommensbezogenen Modal Split für die beiden untersuchten ÖV-Angebote und aufgeschlüsselt nach den Personengruppen. Erwartungsgemäß zeigt sich, dass der ÖV-Anteil in der Personengruppe der Erwerbstätigen mit eingeschränkter Pkw-Verfügbarkeit (EwoC) deutlich höher ist als der ÖV-Anteil in der Personengruppe mit uneingeschränkter Pkw-Verfügbarkeit (EwC). Ebenso ist erwartungsgemäß der ÖV-Anteil in allen Personengruppen beim ÖV-Angebot mit dichterem Takt höher als bei weniger dichtem Takt.

Mit ansteigender Einwohnerzahl bzw. Einwohnerdichte erhöht sich der ÖV-Anteil in al-

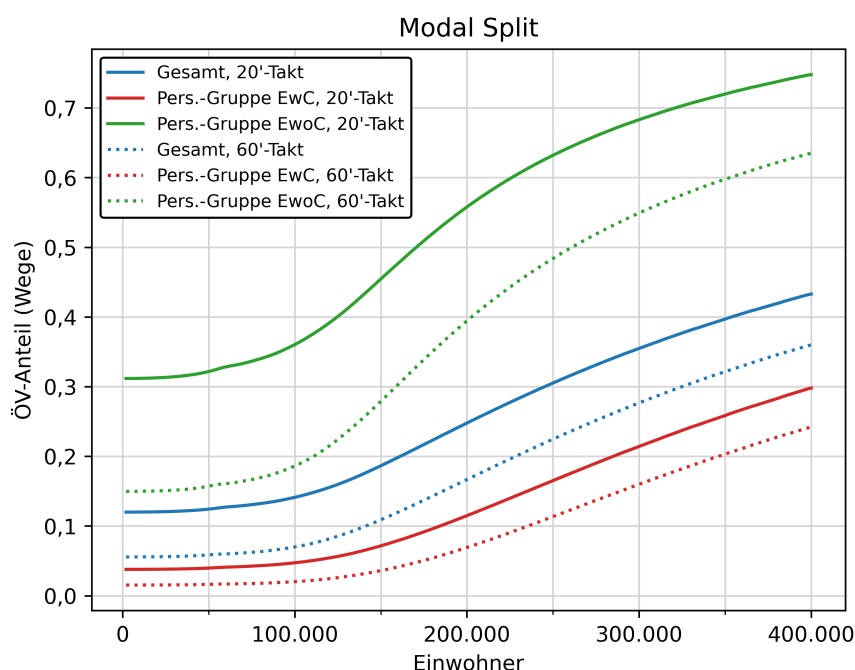


Abbildung 5.3: Vergleich des aufkommensbezogenen Modal Split für die unterschiedlichen Personengruppen und die beiden konstanten ÖV-Angebote.

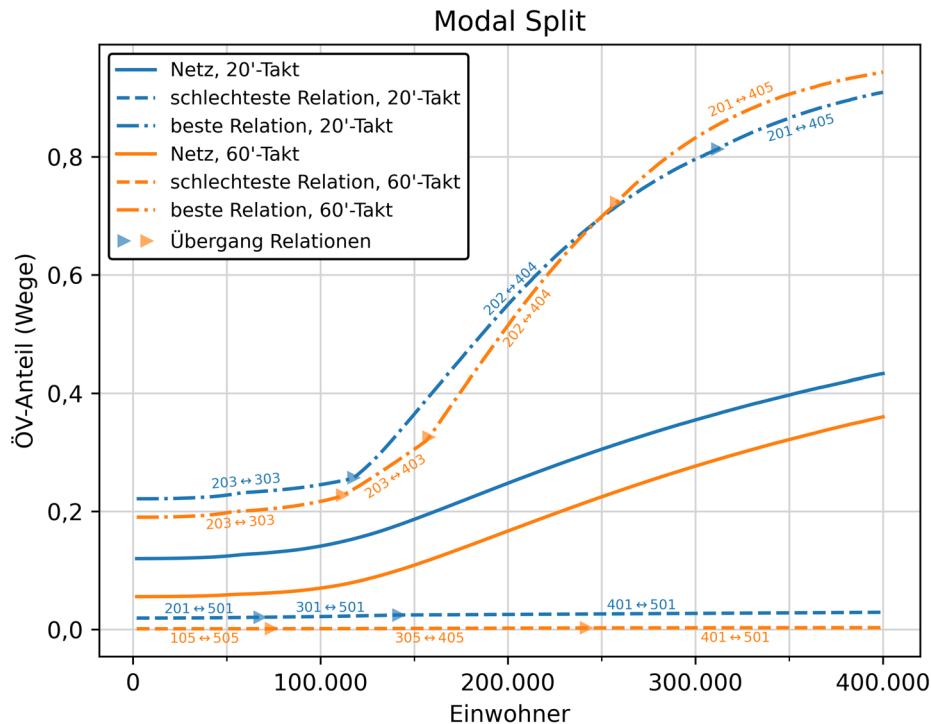


Abbildung 5.4: Vergleich des netzweit gemittelten aufkommensbezogenen Modal Split mit dem Modal Split der Relationen mit jeweils höchstem und niedrigstem ÖV-Anteil für die beiden konstanten ÖV-Angebote. Die jeweilige Relation ist neben der Kurve angegeben.

len Personengruppen. Dies liegt, wie bereits in Abschnitt 5.2 erläutert, an den aufgrund der steigenden IV-Nachfrage ansteigenden Reisezeiten im MIV. Die Entwicklung der Reisezeiten wird im folgenden Abschnitt 5.4 genauer betrachtet. Die Personengruppe EwoC weist den höchsten absoluten Anstieg des ÖV-Anteils auf, die Personengruppe EwC den höchsten relativen Anstieg.

Abbildung 5.4 vergleicht den netzweit nach Aufkommen gemittelten Modal Split im Vergleich zum Modal Split auf den Relationen mit dem höchsten und dem niedrigsten ÖV-Anteil für die beiden untersuchten ÖV-Angebote. Welche Relation den höchsten bzw. niedrigsten ÖV-Anteil aufweist, verändert sich mit der Erhöhung der Einwohnerdichte:

Den höchsten ÖV-Anteil hat bei beiden Experimenten zunächst die Relation 203 ↔ 303, die besonders vom durch die Überlagerung mehrerer Linien besseren ÖV-Angebot profitiert. Später wird diese abgelöst von den Relationen 202 ↔ 404 und schließlich 201 ↔ 405, die mit der Linie 2 das Zentrum durchqueren. Im Experiment mit 60'-Takt hat zwischenzeitlich die Relation 203 ↔ 403, die ebenfalls im Bereich der Überlagerung der meisten Linien liegt, den höchsten ÖV-Anteil. Die Relationen mit höchstem ÖV-Anteil werden mit zunehmender Einwohnerdichte immer länger (vgl. Abschnitt 5.4).

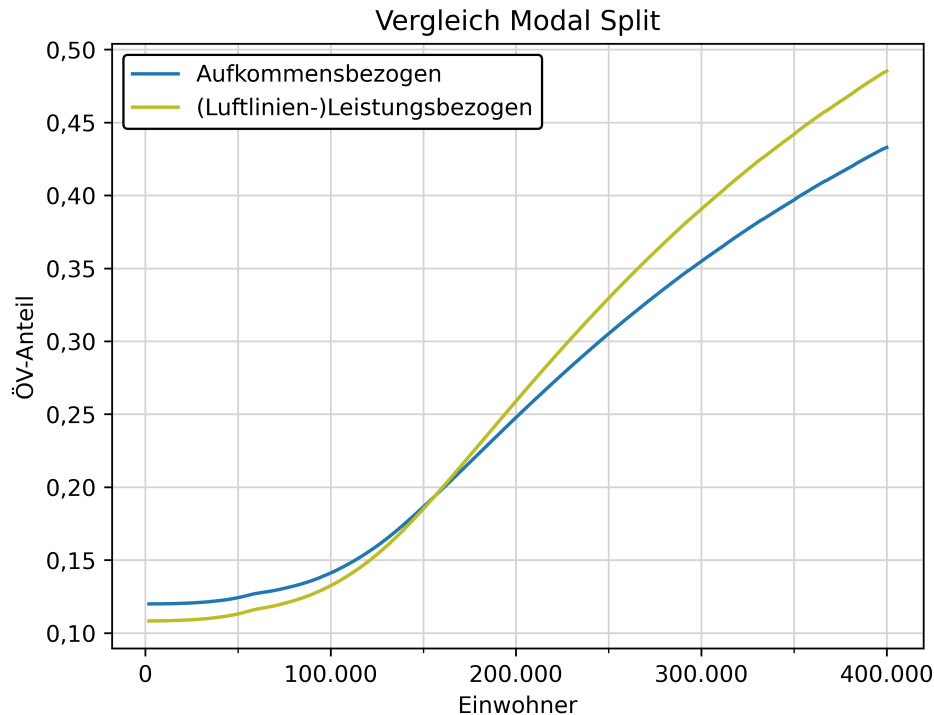


Abbildung 5.5: Vergleich des aufkommensbezogenen und des luftlinienleistungsbezogenen Modal Split bei konstantem ÖV-Angebot mit 20'-Takt.

Die Relationen mit niedrigstem ÖV-Anteil finden sich am rechten und linken Rand der Modellstadt: Aufgrund der Gestaltung des Liniennetzes haben diese im ÖV die höchste Umwegigkeit und stets einen Umstieg. Zu Beginn hat im Experiment mit 20'-Takt die Relation 201 ↔ 501 den geringsten ÖV-Anteil, dieser geht dann über auf die immer kürzeren Relationen 301 ↔ 501 und 401 ↔ 501. Im Experiment mit 60'-Takt spielt sich der geringste ÖV zunächst am rechten Rand ab, auch hier werden die Relationen mit zunehmender Einwohnerdichte kürzer (vgl. Abschnitt 5.4). Am Ende übernimmt auch hier die Relation 401 ↔ 501 am linken Rand.

Interessant ist auch, dass sich die Kurven der Relationen mit dem höchsten ÖV-Anteil für die beiden Fälle schneiden: Während wie in der Betrachtung des Gesamtnetzes bei geringer Einwohnerzahl im Modellraum im Fall des 20'-Takts aufgrund des besseren ÖV-Angebots der höhere ÖV-Anteil herrscht, wird dieser auf der „besten“ Relation bei 250 000 Einwohnern von der Variante mit 60'-Takt abgelöst. Da in diesem Modell aufgrund des schlechteren ÖV-Angebots der ÖV-Anteil im Gesamtnetz niedriger ist, sind bei gleicher Einwohnerzahl aufgrund größerer IV-Nutzerzahlen die IV-Reisezeiten länger als im Modell mit 20'-Takt, wodurch bestimmte Relationen trotz der deutlich höheren Startwartezeiten einen höheren ÖV-Anteil aufweisen als im Fall mit 20'-Takt.

Abbildung 5.5 vergleicht für das Modell mit 20'-Takt den Verlauf des aufkommensbe-

zogenen und des leistungsbezogenen Modal Split, wobei sich der Leistungsbezogene auf die Luftlinienentfernung bezieht. Daraus lässt sich ablesen, dass bei geringen Einwohnerzahlen im Modell der ÖV-Anteil aufkommensbezogen etwas höher ist als der leistungsbezogene Wert. Das bedeutet dass tendenziell bzw. im Mittel mit dem ÖV kürzere Wege zurückgelegt werden als mit dem IV. Bei höheren Einwohnerzahlen im Modell kehrt sich dieses Verhältnis um, dann werden mit dem ÖV im Mittel weitere Wege zurückgelegt als mit dem IV. Dieses Phänomen wird im Abschnitt 5.4 bei der Untersuchung der Reiseweiten eingehender behandelt.

Es ist jedoch auch festzustellen, dass der aufkommensbezogene und der leistungsbezogene Modal Split im betrachteten Modell keine grundsätzlich unterschiedlichen Aussagen machen. Im Folgenden wird darum nur noch die Entwicklung des aufkommensbezogenen Modal Split betrachtet.

5.4 Betrachtungen der Reisezeit und der Reiseweite

Abbildung 5.6 vergleicht für das Experiment mit 20'-Takt im ÖV die IV-Reisezeit (TTC) in der Mittelung anhand der Gesamtnachfragematrix (potentielle Nachfrage) und anhand der Matrix C, die die IV-Nachfrage enthält (realisierte IV-Nachfrage). Es zeigt sich, dass die so erhaltenen Werte für geringe Einwohnerdichten sehr ähnlich sind, während bei hohen Einwohnerdichten die nach realisierter Nachfrage gemittelte Reisezeit unter der nach potentieller Nachfrage gewichteten Reisezeit zurückbleibt. Dies bedeutet, dass auf den Relationen, auf denen noch ein hoher IV-Anteil herrscht, die Zunahme der Reisezeiten nicht ganz so gravierend ausfällt, oder anders formuliert: Auf den Relationen, auf denen die Reisezeit-Zunahme geringer ausfällt, wird in der Moduswahl noch häufiger der MIV gewählt als auf anderen Relationen.

Abbildung 5.7 vergleicht die ÖV-Reisezeit (JRT) in der Mittelung anhand der Gesamtnachfragematrix (potentielle Nachfrage) und anhand der Matrix PuT, die die ÖV-Nachfrage enthält (realisierte ÖV-Nachfrage). Zusätzlich dargestellt ist auch die *empfundene Reisezeit* (PJT), die zusätzlich noch eine Bestrafung von 5 min für einen Umsteigevorgang enthält.

Da das ÖV-Angebot und die Struktur der Gesamtnachfragematrix konstant sind, sind auch die gemäß der potentiellen Nachfrage gemittelte Reisezeit und empfundene Reisezeit konstant. Die anhand der realisierten ÖV-Nachfrage gemittelten Werte liegen darunter, das heißt der ÖV wird auf Relationen mit guten (schnellen) ÖV-Verbindungen deutlich häufiger gewählt als auf Relationen mit schlechteren Verbindungen. Mit zunehmender Einwohnerzahl im Modellraum erhöht sich jedoch diese mittlere ÖV-Reisezeit,

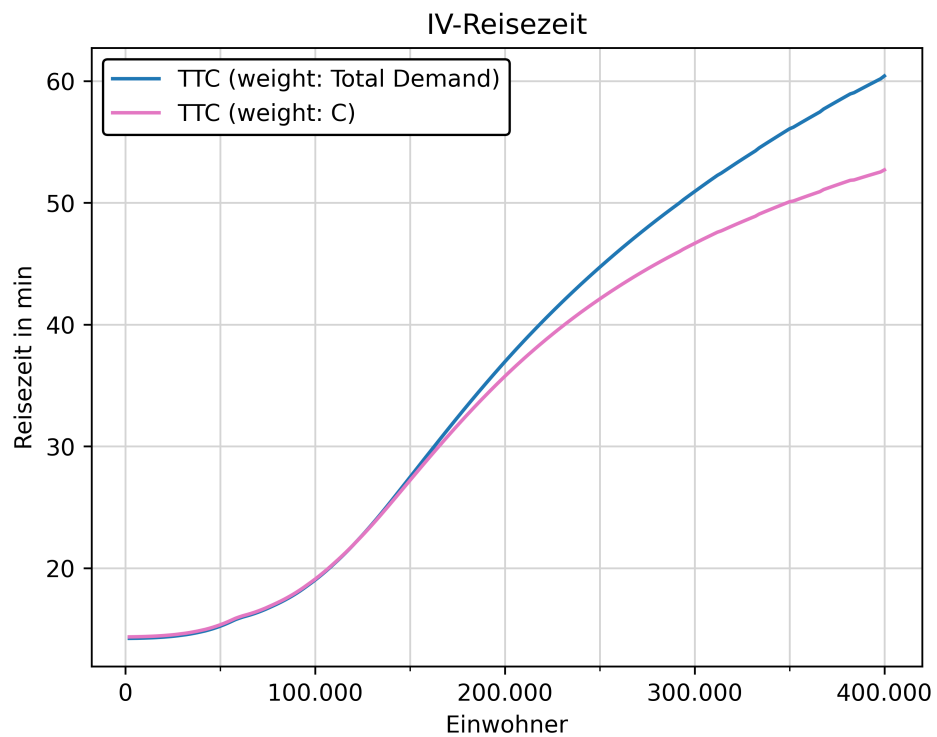


Abbildung 5.6: Vergleich der nach potentieller (Total Demand) und realisierter (C) Nachfrage gewichteten mittleren IV-Reisezeit (TTC) im Netz bei konstantem ÖV-Angebot mit 20'-Takt.

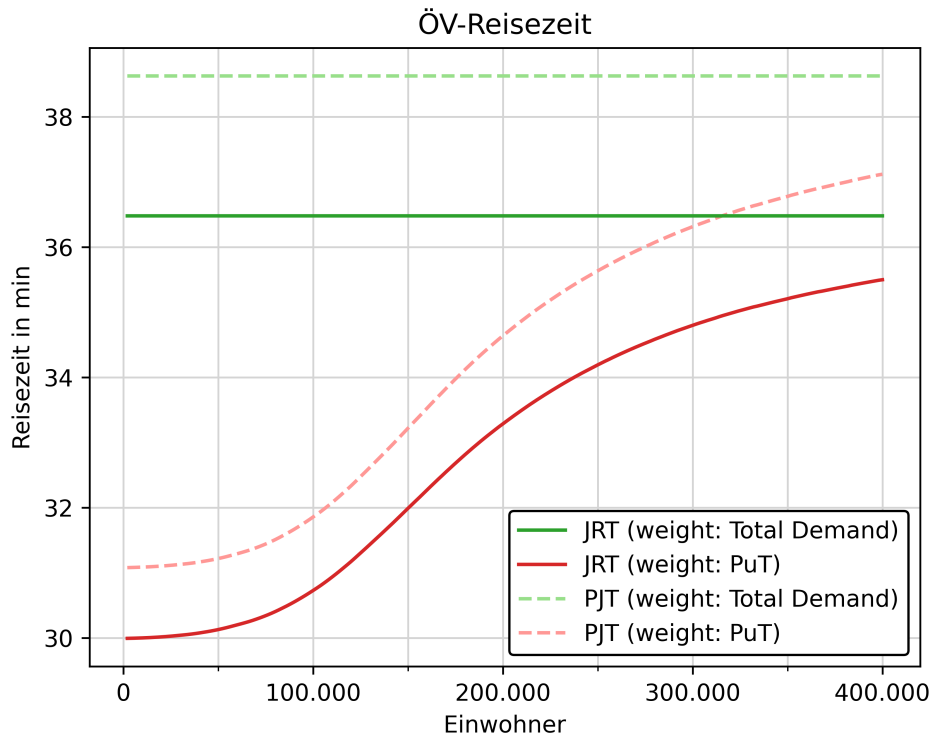


Abbildung 5.7: Vergleich der nach potentieller (Total Demand) und realisierter (PuT) Nachfrage gewichteten mittleren Reisezeit (JRT) und empfundenen Reisezeit (PJT) im ÖV bei konstantem ÖV-Angebot mit 20'-Takt.

das heißt dass aufgrund der Verlängerung der IV-Reisezeiten zunehmend auch längere Relationen und Relationen mit schlechteren Verbindungen im ÖV nachgefragt werden.

Der Abstand zwischen den Kurven für die tatsächliche und die empfundene Reisezeit kommt durch die Bestrafung der Umsteigevorgänge zustande. Er ist für die realisierte Nachfrage bei geringer Einwohnerdichte geringer als für die potentielle Nachfrage, da auf Relationen mit Umsteigeverbindungen deutlich unterdurchschnittlich der ÖV gewählt wird. Bei hoher Einwohnerdichte nimmt der Abstand zwischen PJT und JRT zu, das heißt es werden zunehmend auch Umsteigeverbindungen nachgefragt.

In Abbildung 5.8 werden die mittlere Reisezeit und Reiseweite je Modus und für die Gesamtnachfrage verglichen. Wie bereits diskutiert steigt die Reisezeit mit zunehmender Einwohnerzahl im Modell in beiden Modi an, wobei die IV-Reisezeit, die aufgrund der voller werdenden Straßen zunimmt, schneller ansteigt als die ÖV-Reisezeit, die nur aufgrund von Verschiebungen in der Moduswahl ansteigt. Ab 182 000 Einwohnern übersteigt die mittlere IV-Reisezeit die mittlere ÖV-Reisezeit.

Die Reiseweite bezogen auf die Gesamtnachfrage bleibt konstant, da durch die fixierte Zielwahl die Struktur der Gesamtnachfrage unverändert bleibt. Änderungen gibt

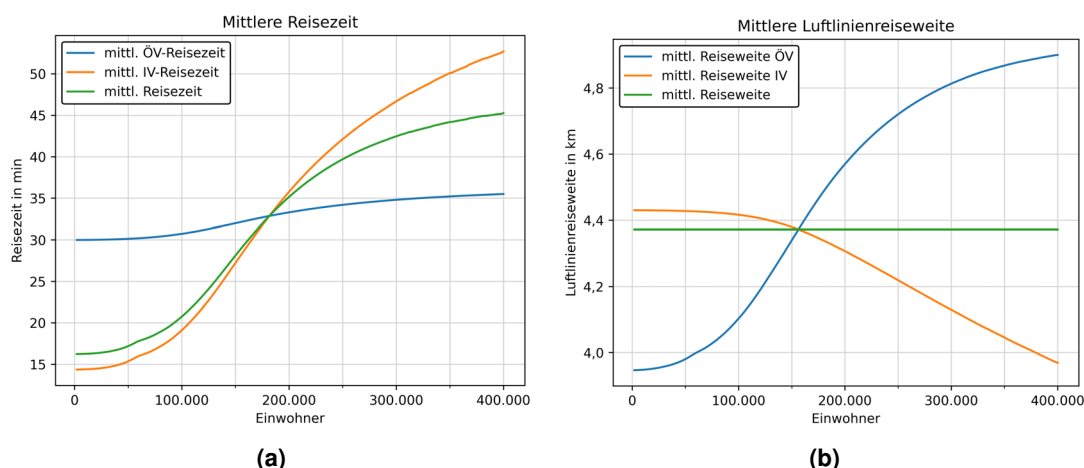


Abbildung 5.8: Mittlere Reisezeit (gemittelt nach realisierter Nachfrage) und Luftlinienreiseweite der Modi IV und ÖV im Vergleich bei konstantem ÖV-Angebot im 20'-Takt.

es hingegen bezüglich des Aspekts, welcher Modus eher für längere bzw. für kürzere Fahrten gewählt wird. So nimmt die bei niedriger Einwohnerzahl geringe ÖV-Reiseweite bei steigender Einwohnerzahl zu, während die zunächst hohe IV-Reiseweite abnimmt. Ab 158 000 Einwohnern übersteigt die mittlere ÖV-Reiseweite die mittlere IV-Reiseweite.

Dies liegt an den Charakteristika des Logit-Modells. Es ergibt sich aus der Eigenschaft, dass die **Differenzen** der Nutzen bzw. Widerstände bewertet werden. Ist der (durchschnittliche) Widerstand pro Streckeneinheit im IV geringer als im ÖV, wird bei zunehmender Strecke die Wahl des ÖV immer unwahrscheinlicher. Erreicht hingegen die Belastung des IV-Netzes ein Niveau, in dem der (durchschnittliche) ÖV-Widerstand pro Streckeneinheit geringer ist als der Widerstand im IV, so kehrt sich dieser Effekt um und die Wahl des IV wird mit zunehmender Strecke immer unwahrscheinlicher. Ob diese Eigenschaft so in der Realität auch zutrifft darf hinterfragt werden. Bei einem Wahlmodell, das die *Verhältnisse* der Nutzen bzw. Widerstände bewertet, würde dieser Effekt nicht in dieser Form auftreten.

Abbildung 5.9 vergleicht die IV-Reisezeit in den Experimenten mit 20'-Takt im ÖV, 60'-Takt im ÖV sowie dem Vergleichsfall ohne ÖV-Angebot. Um die Vergleichbarkeit mit letzterem zu gewährleisten und da es sich um eine Untersuchung „aus Netzsicht“ handeln soll, wurde für diesen Vergleich die Mittelung nach potentieller Nachfrage ausgewählt. Während die Kurven im Bereich niedriger Einwohnerzahlen nahezu identisch verlaufen, steigt die IV-Reisezeit im Modell ohne ÖV-Angebot ungebremst an, während die Reisezeiten in den beiden Modellen mit ÖV-Angebot in einen degressiven Verlauf übergehen und deutlich unter der im erstgenannten Zustand zurückbleiben. Es lässt

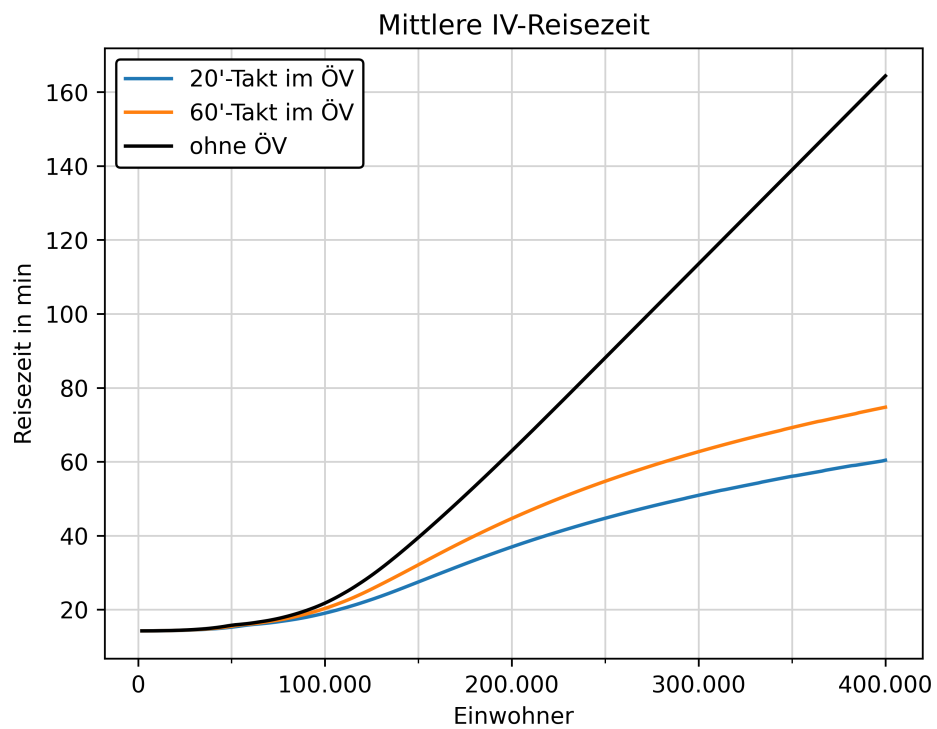


Abbildung 5.9: Vergleich der (nach potentieller Nachfrage gewichteten) mittleren IV-Reisezeit für die beiden konstanten ÖV-Angebote und den Vergleichsfall gänzlich ohne ÖV.

sich daraus schließen, dass die Existenz des öffentlichen Verkehrs die Stadt vor dem „Kollaps“ bewahrt, und dass der öffentliche Verkehr eine gewisse Dichte überhaupt erst ermöglicht.

Bisher wurden die Reiseweite und die Reisezeit isoliert voneinander betrachtet. Während die grundsätzlichen Aussagen nachvollziehbar und konsistent sind, lässt sich daraus jedoch beispielsweise nicht sicher sagen, ob die Zunahme der ÖV-Reisezeit durch Moduswahl tatsächlich auf die vermehrte Wahl von „schlechten“ Verbindungen, also Relationen mit Umstieg, zurückführen lässt oder ob sie allein durch die Verschiebung zu längeren Verbindungen zustande kommt. Daher wird in Abbildung 5.10 die Luftliniengeschwindigkeit betrachtet. Diese kombiniert die Moduswahl auf unterschiedlichen Relationen und den Netzzustand bzw. die Reiseweite und die Reisezeit zu einer einheitlichen Aussage.

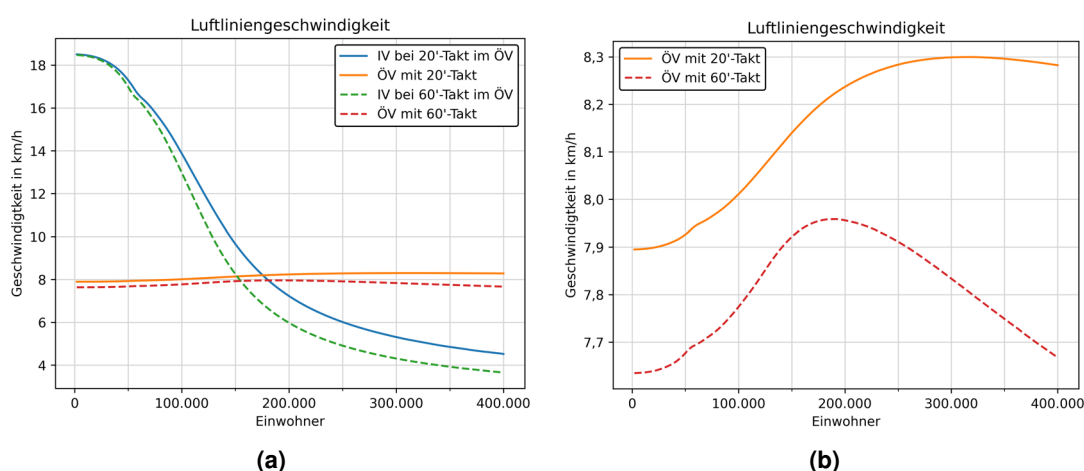


Abbildung 5.10: Durchschnittliche Luftliniengeschwindigkeit im IV und im ÖV für die beiden Modelle mit unterschiedlichem ÖV-Angebot. Die rechte Abbildung zeigt einen Ausschnitt, auf dem durch die andere Skalierung der Geschwindigkeitsachse die Effekte im ÖV besser erkennbar sind.

Im IV sinkt die Luftliniengeschwindigkeit mit zunehmender Bevölkerung stark ab, und zwar im Modell mit 60'-Takt stärker als im Modell mit 20'-Takt. Dieses Erkenntnis ist so bereits Abbildung 5.9 zu entnehmen.

Im ÖV steigt die Luftliniengeschwindigkeit zunächst. Das liegt an den zunehmenden Reiseweiten je Weg im ÖV. Zwar ist die Fahrtgeschwindigkeit an allen Stellen des Busnetzes gleich, jedoch fällt mit steigender Reiseweite der deutlich langsamere Zu- und Abgang immer weniger ins Gewicht. Im weiteren Verlauf nimmt die Luftliniengeschwindigkeit im ÖV wieder ab. Dies ist nun auf die vermehrte Wahl des ÖV auf Umsteigerelationen zurückzuführen. Durch die Umsteigewartezeiten haben diese eine geringe

Luftliniengeschwindigkeit.

Im Modell mit 20'-Takt ist die ÖV-Luftliniengeschwindigkeit höher als im Modell mit 60'-Takt. Auch geht hier die Luftliniengeschwindigkeit im Bereich höherer Einwohnerzahlen nicht so stark zurück. Beides liegt an den hier deutlich kürzeren Umsteigewartezeiten.

5.5 Verkehrsleistung je Modus

Bisher wurden der Modal Split und die Entwicklung der durchschnittlichen Reiseweiten isoliert voneinander betrachtet. Abbildung 5.11 zeigt die Entwicklung der Gesamt-Verkehrsleistung der beiden Modi für die beiden ÖV-Angebote und die Verteilung der Verkehrsleistung je Einwohner auf die beiden Modi. Darin sind nun beide Effekte enthalten: Dass der Modus ÖV sowohl für *mehr Wege* als auch für *längere Wege* gewählt wird, bzw. die umgekehrten Entwicklungen im IV. Wie bereits aus der Diskussion der einzelnen Effekte hervorgeht, sinkt die IV-Verkehrsleistung je Einwohner mit steigender Dichte, während sie im ÖV steigt. Aufgrund der durch die fixierte Zielwahl konstanten (luftlinienbezogenen) Gesamtreiseweite pro Einwohner verlaufen diese beiden Kurven symmetrisch.

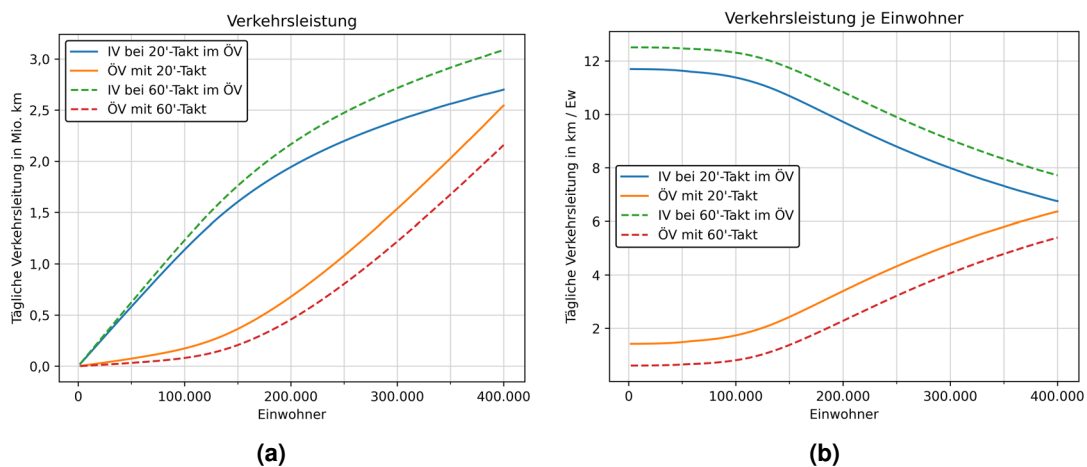


Abbildung 5.11: Luftlinienbezogene Verkehrsleistung je Modus (a) und Luftlinienbezogene Verkehrsleistung pro Einwohner je Modus (b) für die beiden Experimente mit konstantem ÖV-Angebot.

5.6 Resümee

Die im Modell auftretenden Effekte lassen sich anhand der getroffenen Annahmen gut nachvollziehen. Die Charakteristika des Logit-Modells in der Moduswahl treten dabei deutlich hervor, was bei der Interpretation der Ergebnisse im Hinterkopf behalten werden muss.

Im Bezug auf den Zusammenhang zwischen Dichte und ÖV-Anteil bildet das Modell den Wirkungszusammenhang, dass die erhöhte Nachfrage zu einem Anstieg der IV-Reisezeiten und damit zu einer Änderung der Moduswahl zugunsten des ÖV führt, sehr gut ab. Außerdem zeigt sich, dass ein von vornherein attraktiveres ÖV-Angebot den Anstieg der Reisezeiten im IV etwas abmildert. Der ÖV ermöglicht also erst eine gewisse Dichte bei gleichzeitiger Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der Stadt.

Allein mit dem Wirkungspfad über die IV-Reisezeiten zeigt sich auch bereits der Effekt, dass die IV-Verkehrsleistung pro Kopf mit steigender Dichte sinkt, während die absolute IV-Verkehrsleistung mit steigender Einwohnerzahl selbstverständlich steigt.

6 Untersuchung des Modellverhaltens mit Taktanpassung

6.1 Idee der Untersuchung

Gemäß den in Abschnitt 2.5 dargestellten Überlegungen wirkt die Einwohnerdichte auch auf das ÖV-Angebot. Der wesentliche Wirkungspfad dabei ist, dass durch die Dichte die ÖV-Nachfrage und somit auch die Auslastung im ÖV ansteigt. Wenn durch die erhöhte Auslastung die Kapazität (zeitweise) überschritten wird, muss demnach das ÖV-Angebot angepasst werden, um die Kapazität zu erhöhen und somit eine Abwicklung der Nachfrage zu gewährleisten. Die Erhöhung der Kapazität in Form einer Taktverdichtung steigert außerdem die Attraktivität des ÖV und gewinnt somit zusätzliche Fahrgäste durch veränderte Moduswahl. Die Attraktivitätssteigerung erfolgt durch die häufigeren Fahrtmöglichkeiten und dadurch verringerte Anpassungs- bzw. Startwartezeiten, sowie auf Umsteigeverbindungen auch durch verkürzte Reisezeiten, da sich teilweise die Umsteigewartezeiten verkürzen.

Um diese Effekte im Verkehrsnachfragemodell abbilden zu können, muss die Überprüfung der Kapazitätseinhaltung und eine Möglichkeit der Kapazitätserhöhung in die Modellberechnung integriert werden. Da die Kapazitätserhöhung in Form einer Taktverdichtung Rückwirkungen auf die Moduswahl hat, erweitert sich der Modellablauf um eine Iterationsschleife. Der Berechnungsablauf für die Untersuchung mit Taktanpassung ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Abbildung 6.2 zeigt, welche Wirkungszusammenhänge für diese Untersuchung im Modell abgebildet sind.

Die Überprüfung der Kapazitätseinhaltung erfolgt dahingehend, dass bereits die Überschreitung der Kapazität einer Fahrt an einer Stelle im Fahrtverlauf als Kapazitätsüberschreitung auf dieser Linie gewertet wird. Da im verwendeten Modell die Verteilung der Nachfrage innerhalb einer Stunde konstant ist, entspricht das in der Regel auch der Überschreitung über die Spitzenstunde, die Kapazitätsüberschreitung einzelner Fahrten ist jedoch im Modell leichter festzustellen.

Die Kapazitätsanpassung erfolgt dadurch, dass diese Linie dann einen neuen Fahrplan mit einem dichteren Takt erhält, wobei die Abfahrtszeiten der ersten und letzten

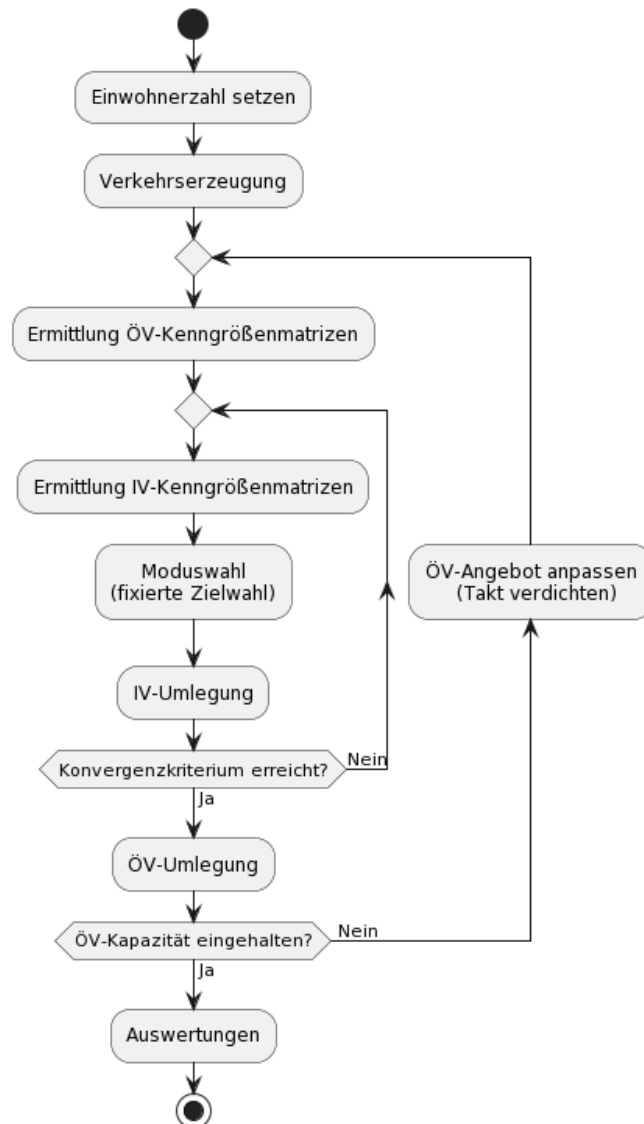


Abbildung 6.1: Prozessgraph des Berechnungsablaufs im Verkehrsmo-
dell für die Untersuchung mit Taktanpassung. Eigene Darstellung.

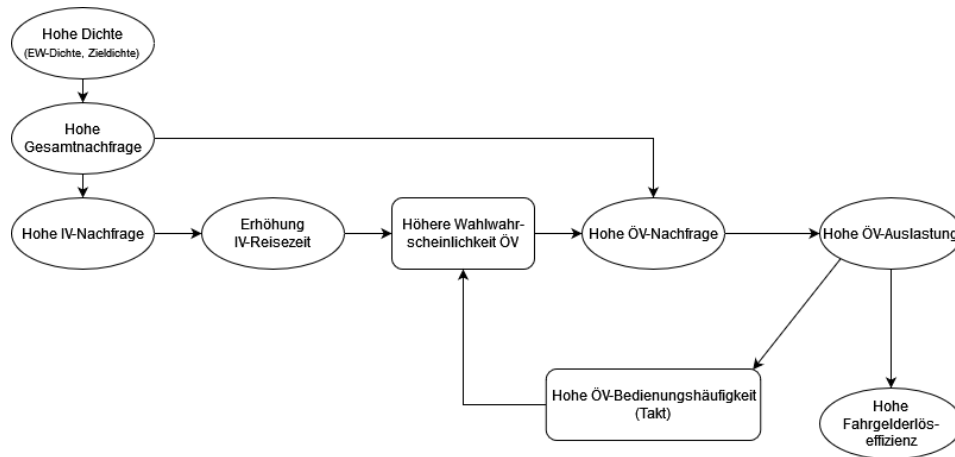


Abbildung 6.2: Wirkungszusammenhänge des Einflusses der Dichte auf ÖV-Anteil und ÖV-Angebot, wie sie in der Modelluntersuchung mit Taktanpassung berücksichtigt werden. Eigene Darstellung.

Fahrt erhalten bleiben. Als neuer Takt wird aus einer Taktliste der im Vergleich zum bisherigen Takt der Linie nächstdichtere Takt gewählt. Diese Taktliste umfasst in der hier vorgestellten Untersuchung: 60'-, 30'-, 20'-, 15'-, 10'-, 5'- und 2'-Takt. Die Linie verkehrt dann im gesamten Untersuchungszeitraum in diesem Takt, eine Unterscheidung in HVZ und NVZ erfolgt trotz zeitlich differenzierter Nachfrage nicht. Da die in Abbildung 6.1 gezeigte äußere Iterationsschleife so lange durchlaufen wird, bis die Kapazitätsbedingung erfüllt ist, kann es prinzipiell vorkommen, dass eine Linie in einem Modelldurchlauf mehrfach einen neuen Fahrplan erhält, also ein Takt „übersprungen wird“.

Zu Beginn der Untersuchung verkehren alle Linien im 60'-Takt. Wie bereits bei der Untersuchung ohne Berücksichtigung der Kapazität wird mit einer Einwohnerzahl von 2000 begonnen und diese in Schritten von 2000 erhöht. Für diese erneuten Modelldurchläufe mit erhöhter Einwohnerzahl wird dann ein zuvor eventuell bereits angepasster Fahrplan als „neuer Grundzustand“ beibehalten. Die Erhöhung der Einwohnerzahl erfolgt in dieser Untersuchung nicht bis zu einer vordefinierten Grenze, sondern bis auf der ersten Linie trotz 2'-Takt die Kapazität nicht mehr eingehalten werden kann. Damit endet das Experiment.

In dieser Untersuchung bleibt der Fahrpreis konstant. Der Kostendeckungsgrad wird als ein Ergebnis betrachtet.

6.2 Betrachtungen des ÖV-Angebots und der Auslastung

Erwartungsgemäß ist die Linie 1, die den starken Einwohnerschwerpunkt in Zelle 101 anbindet, die erste Linie, deren Takt verdichtet werden muss und auch die erste Linie,

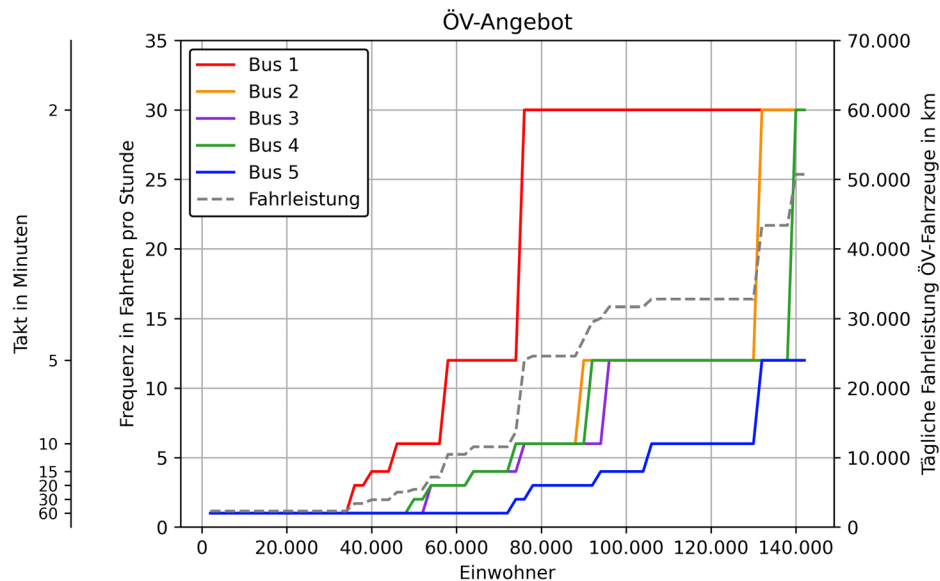


Abbildung 6.3: Entwicklung des ÖV-Angebots auf den einzelnen Linien als Bedienungsfrequenzen und Bus-Fahrleistung im Gesamtnetz.

die ihr endgültiges Kapazitätslimit erreicht und somit das Experiment beendet. Abbildung 6.3 zeigt das Angebot auf den einzelnen Linien im Verlauf des Experiments sowie die Fahrleistung im gesamten Liniennetz. Als Skala für die Darstellung des Angebots wurde die Frequenz, also Fahrten pro Stunde, gewählt, da sie anders als die Fahrtenfolgezeit (Takt) maßstäblich zum damit verbundenen Betriebsaufwand ist. Die zugehörigen Taktzahlen sind auf einer weiteren Skala neben dem Diagramm den Frequenzen zugeordnet. In dieser Darstellung fällt auf, dass vor allem der Sprung vom 5'- auf den 2'-Takt absolut gesehen die höchste Steigerung im Betriebsaufwand darstellt.

Außerdem zeigt die Abbildung 6.3 die Fahrleistung der ÖV-Fahrzeuge als Maß für den Betriebsaufwand im Gesamtnetz und deren Zunahme mit der Einwohnerzahl im Modell.

Abbildung 6.4 zeigt für jede Linie und für das Gesamtnetz das Verhältnis zwischen den erbrachten Personenkilometern und den angebotenen Platz-Kilometern, hier als *Angebotseffizienz* bezeichnet. Sie entspricht der durchschnittlichen Auslastung über den gesamten Tag und den gesamten Linienweg. Da im betrachteten Modell in der Nebenverkehrszeit das auf die Hauptverkehrszeit dimensionierte Angebot unverändert weiterläuft, sind diese Werte nicht besonders hoch.

Am gezackten Verlauf gut erkennbar sind die Kapazitätsausweitungen durch die Taktverdichtung auf den einzelnen Linien und die im weiteren Verlauf mit steigender Nachfrage wieder zunehmenden Auslastungen.

Ebenfalls gut zu erkennen sind ein leichter Rückgang und im Folgenden eine ge-

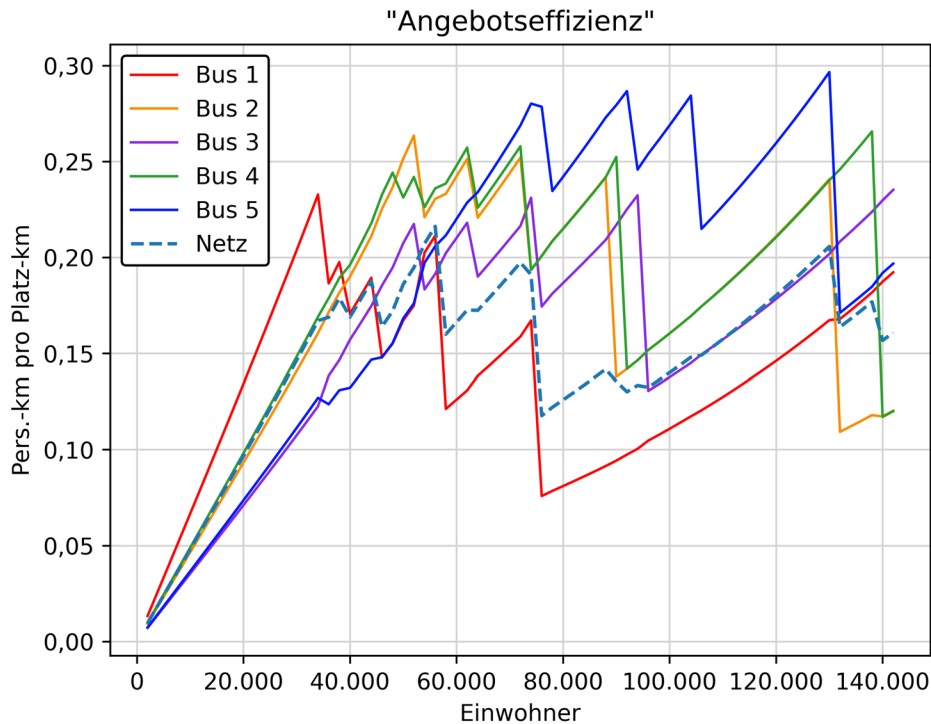


Abbildung 6.4: „Angebotseffizienz“ (Personenkilometer pro Platzkilometer) der unterschiedlichen Linien im Verlauf des Experiments.

ringere Zunahme der Angebotseffizienz auf Linie 5 im Bereich zwischen 30 000 und 40 000 Ew. Dies liegt an den Taktverdichtungen auf Linie 1. Da Linie 1 und Linie 5 zwischen 103 und 503 auf einem relativ langen Abschnitt parallel verkehren, verliert die Linie 5 auf diesen Relationen Fahrgäste an die nun öfter verkehrende Linie 1. Demgegenüber zeigt Linie 3 hier einen kleinen zusätzlichen Zugewinn. Dies lässt sich mit durch die nun häufiger verkehrende Linie 1 attraktiver werdenden Umsteigeverbindungen erklären.

6.3 Betrachtungen des Modal Split

Abbildung 6.5 zeigt die Entwicklung des Modal Split im Verlauf des Experiments im Vergleich zu den beiden Untersuchungen aus Kapitel 5. Zu Beginn folgt der ÖV-Anteil in dieser Untersuchung genau dem aus der Untersuchung mit konstantem 60'-Takt auf allen Linien, da hier zu Beginn das gleiche ÖV-Angebot vorliegt. Durch die aus Kapazitätsgründen notwendige Taktverdichtung verringert sich die Startwartezeit t^{OWT} , wodurch der Modus ÖV attraktiver wird und der ÖV-Anteil gegenüber dem Vergleichsfall deutlich steigt. Auch verringern sich auf Umsteigeverbindungen die Reisezeiten, da sich

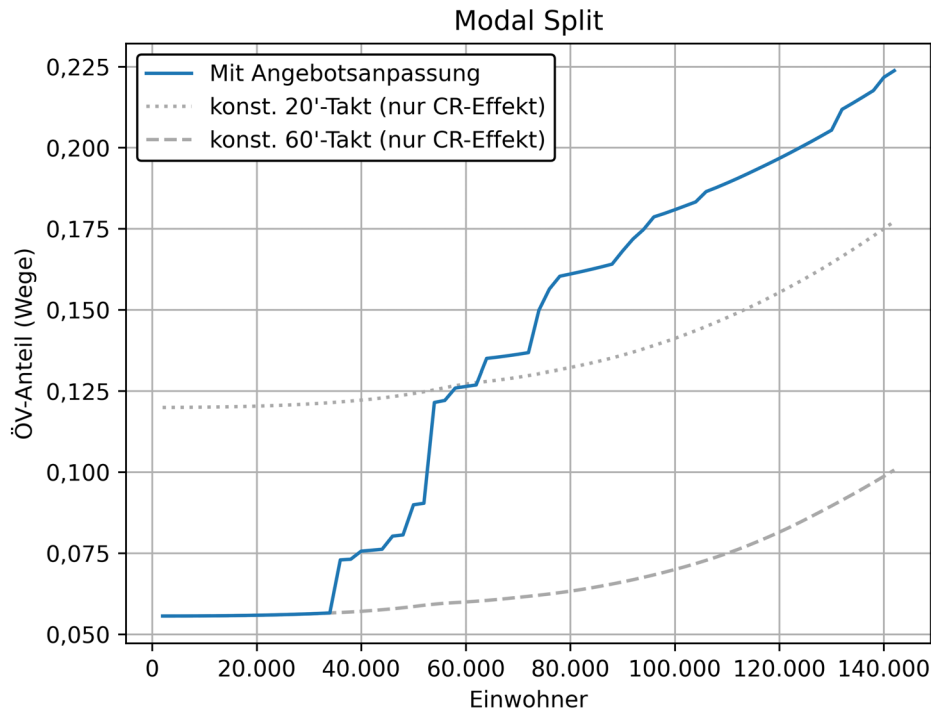


Abbildung 6.5: ÖV-Anteil in der Untersuchung mit Taktanpassung im Vergleich mit den Untersuchungen mit konstantem ÖV-Angebot.

die Umsteigewartezeiten durch die Taktverdichtungen verkürzen. Auch dies trägt zum starken Anstieg des ÖV-Anteils bei. Im weiteren Verlauf ab etwa 100 000 Einwohnern verläuft der Modal Split auf höherem Niveau weitgehend parallel zu den Verläufen aus den Experimenten mit konstantem ÖV-Angebot. Hier stellen die weiteren Angebotsausweitungen offenbar nur noch geringe Verbesserungen im Bezug auf die Startwartezeit und die Umsteigewartezeit dar.

Abbildung 6.6 vergleicht den Modal Split für unterschiedliche Relationsgruppen: Die Relationen sind danach in Gruppen zusammengefasst, welche Linie auf ihnen eine umsteigefreie Verbindung anbietet, oder ob keine solche Direktverbindung besteht. Die Relationen auf der zentralen Nord-Süd-Achse, wo sich mehrere Linien überlagern, gehören folglich zu mehreren Relationsgruppen. In Abbildung 6.7 sind die Modal-Split-Werte der Relationsgruppen nach Linien nochmals dargestellt, dazu ist das jeweilige Angebot auf den einzelnen Linien zusätzlich eingezeichnet. Dadurch lassen sich die Modal-Split-Werte gut mit dem jeweiligen Taktangebot vergleichen.

Zunächst ist in Abbildung 6.6 gut ersichtlich, dass auf den Relationen mit Direktverbindung ein höherer ÖV-Anteil herrscht als auf den Relationen ohne Direktverbindung bzw. als über das Gesamtnetz gesehen.

Aus Abbildung 6.7 geht hervor, dass die größten Sprünge im Verlauf des ÖV-Anteils

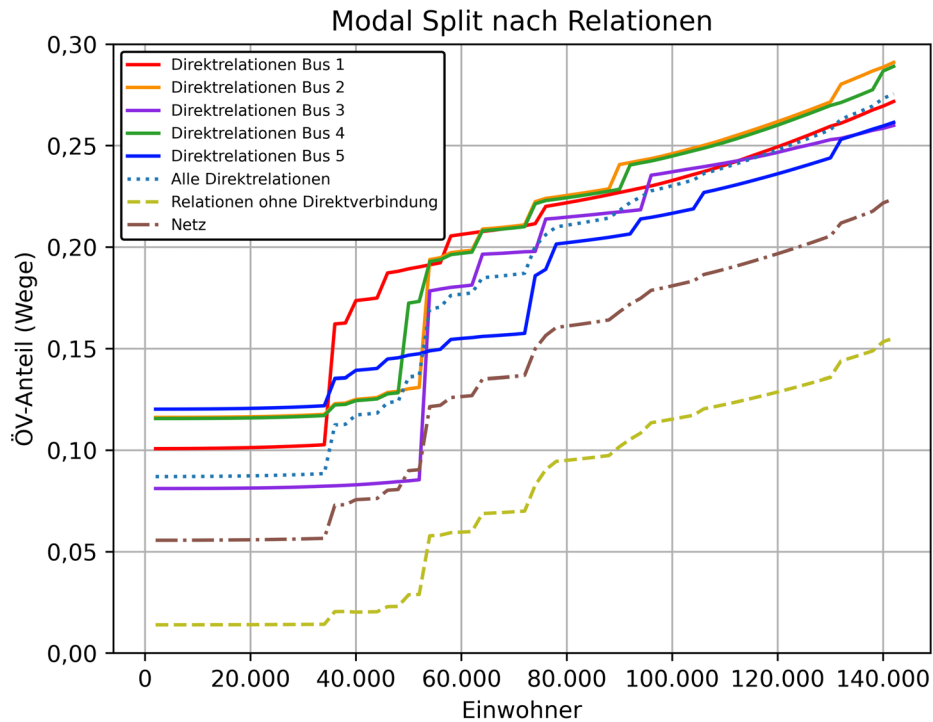


Abbildung 6.6: Modal Split auf Gruppen von Relationen, die danach gebildet wurden, ob und durch welche Linie eine umsteigefreie Verbindung angeboten wird.

auf die erste Angebotsverbesserung vom 60'-Takt zum 30'- (Linien 4 & 5) bzw. 20'-Takt (Linien 1, 2, 3) zurückzuführen sind. Die weiteren Angebotsverbesserungen, die auf der Skala der Frequenzen bzw. Aufwände deutlich höhere Steigerungen darstellen, sorgen im Verlauf des Modal Split für deutlich kleinere Stufen. Auffällig ist auch ein Stufenförmiger Anstieg der Relationsgruppe zu Linie 5 bei der ersten Angebotsverbesserung auf Linie 1. Dies liegt an der langen Überlagerung der beiden Linien, da somit einige Relationen mit durch Linie 1 deutlich verbessertem Angebot in den Durchschnitt der Relationsgruppe 5 eingehen.

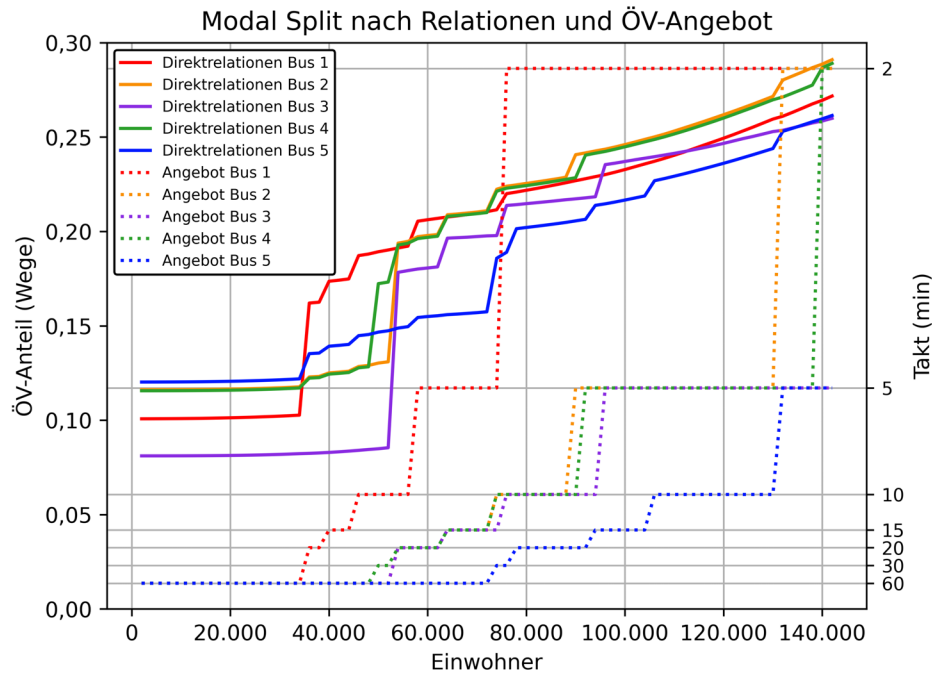


Abbildung 6.7: Modal Split auf Gruppen von umsteigefreien Relationen nach Linie sowie das Angebot je Linie.

6.4 Betrachtungen der Reisezeit

Abbildung 6.8 vergleicht die nach potentieller und realisierter Nachfrage gewichteten ÖV-Reisezeiten im Verlauf des Experiments. Während die nach realisierter Nachfrage gewichtete Reisezeit aufgrund der mit steigendem ÖV-Anteil ansteigenden Nutzung weiterer und ungünstiger Verbindungen mit steigender Einwohnerdichte wieder leicht ansteigt, fällt die nach potentieller Nachfrage gewichtete Reisezeit in dieser Untersuchung stark ab. Dies liegt an den durch die dichteren Takte deutlich verkürzten Umsteigewartezeiten. Bei der nach realisierter Nachfrage gewichteten Reisezeit treten die stufenartigen Anstiege synchron zu den stärksten Rückgängen bei der nach potentieller Nachfrage gewichteten auf. Das lässt darauf schließen, dass die hier attraktiver werdenden Umsteigeverbindungen dann auch häufiger gewählt werden, und somit den Durchschnitt der Reisezeiten erhöhen.

Abbildung 6.9a vergleicht die nach potentieller und realisierter Nachfrage gewichteten IV-Reisezeiten im Verlauf des Experiments. Die Kurven verlaufen sehr nahe beieinander, wobei zunächst die nach realisierter und später die nach potentieller Nachfrage gewichtete Reisezeit etwas höher ist. Dies liegt daran, dass im ÖV bei geringer Einwohnerzahl vor allem besonders kurze Relationen nachgefragt werden, was den Durchschnitt der realisierten IV-Reisezeiten erhöht. Später kehrt sich dieser Effekt wie bereits

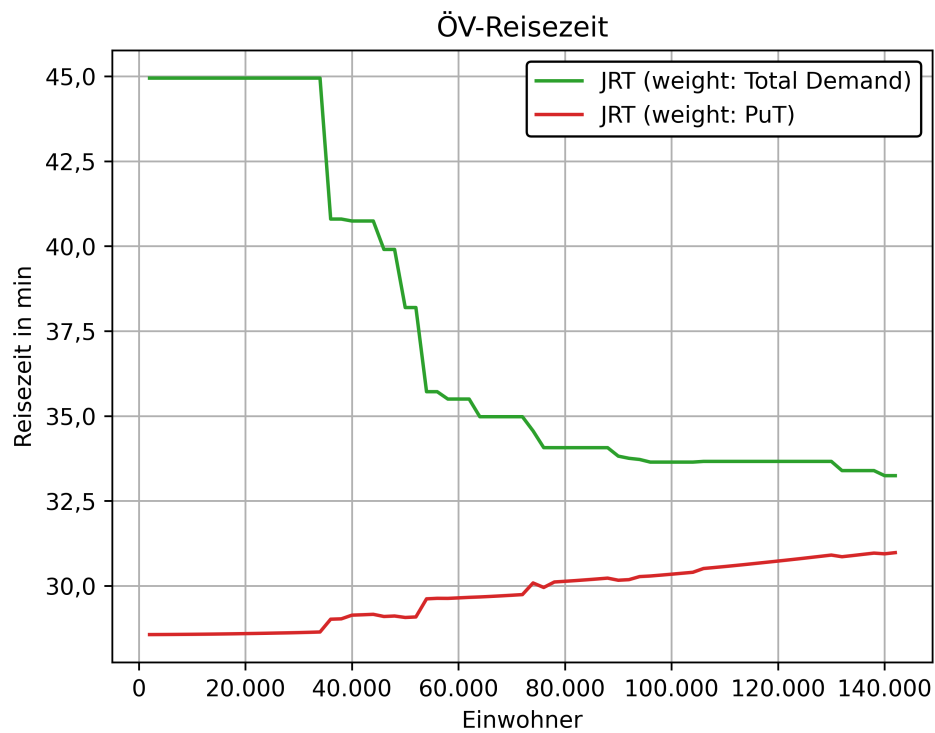


Abbildung 6.8: Entwicklung der ÖV-Reisezeit (JRT) gewichtet mit der potentiellen und mit der realisierten Nachfrage.

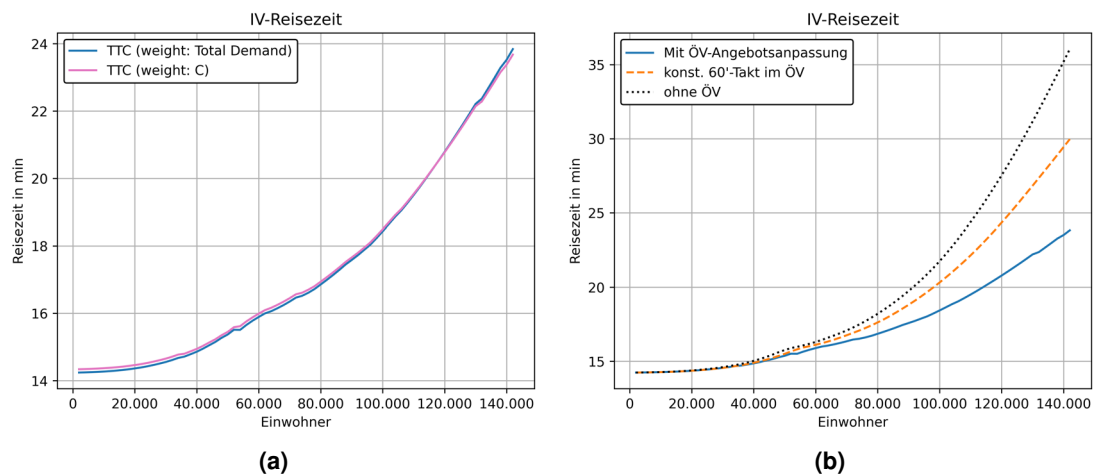


Abbildung 6.9: Entwicklung der IV-Reisezeit in der Untersuchung mit Taktanpassung: Vergleich zwischen Gewichtung mit potentieller und realisierter Nachfrage (a) und Vergleich mit Untersuchungen mit konstantem sowie ohne ÖV-Angebot (b).

diskutiert aufgrund des Logit-Modells um. Der Verlauf der beiden Kurven ähnelt dem im Modell ohne Angebotsanpassung im entsprechenden Bereich der Einwohnerzahlen, sie verlaufen jedoch nicht ganz so glatt, was durch die sprunghaften Verbesserungen des ÖV-Angebots und deren Auswirkungen auf die Moduswahl verursacht wird. Beispielsweise ist bei knapp über 50 000 Ew eine kurze Unterbrechung des Anstiegs zu erkennen. Diese liegt an der gleichzeitigen Angebotsverbesserung auf den Linien 2, 3 und 4 (vgl. Abb. 6.3 bzw. 6.7) und dem dadurch deutlichen Anstieg des ÖV-Anteils an dieser Stelle (vgl. Abb. 6.5). Die Entlastung des IV-Netzes durch ein gutes ÖV-Angebot ist hier also erkennbar.

Abbildung 6.9 vergleicht den Anstieg der (nach potentieller Nachfrage gewichteten) Reisezeit im IV-Netz mit der aus den Experimenten mit konstantem 60'-Takt und völlig ohne ÖV-Angebot. Die IV-Reisezeit im Modell mit Angebotsanpassung im ÖV bleibt deutlich unter den IV-Reisezeiten in den anderen Untersuchungen zurück. Ein leistungsfähiger ÖV entlastet das IV-Netz also maßgeblich und leistet so bei hohen Dichten einen wesentlichen Beitrag zur Gewährleistung der Erreichbarkeit mit dem IV.

6.5 Vergleich mit realen Daten

Um die Modellergebnisse einschätzen zu können, wurde ein Vergleich mit den in 2.6 verwendeten realen Daten von deutschen Städten durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde aus den vorliegenden Modal-Split-Daten der ÖV-Anteil des bimodalen Modal Split des motorisierten Verkehrs berechnet:

$$\phi_{\text{ÖV}}^{\text{b}} = \frac{\phi_{\text{ÖV}}}{\phi_{\text{ÖV}} + \phi_{\text{MIV},s} + \phi_{\text{MIV},m}}. \quad (6.1)$$

Zunächst wurde der Einwohnerzahl-Einwohnerdichte-Zusammenhang, der sich aus der gewählten Fläche der Modellstadt von 100 km² ergibt, im Vergleich mit den tatsächlichen Einwohnerzahlen und Einwohnerdichten deutscher Städte visualisiert (Abbildung 6.10a). Es zeigt sich, dass der untersuchte Bereich in einen Ausschnitt des Diagramms fällt, in dem viele reale Städte zu finden sind. Die räumliche Ausdehnung der Modellstadt und das untersuchte Intervall an Einwohnerzahlen sind also sinnvoll gewählt. Abbildung 6.10b zeigt den Zusammenhang zwischen der absoluten Einwohnerzahl und dem sich im Modell ergebenden ÖV-Anteil im Vergleich mit den tatsächlichen Werten des bimodalen Modal Splits der realen deutschen Städte. Auch bei dieser Darstellung zeigt sich dass die Kurve der Modellergebnisse im Diagramm entlang der Punkte der realen Daten verläuft. Abbildung 6.11 vergleicht schließlich den Verlauf des (bimodalen) Modal Split in Abhängigkeit der Einwohnerdichte. Hier streuen die Punkte der realen Daten im

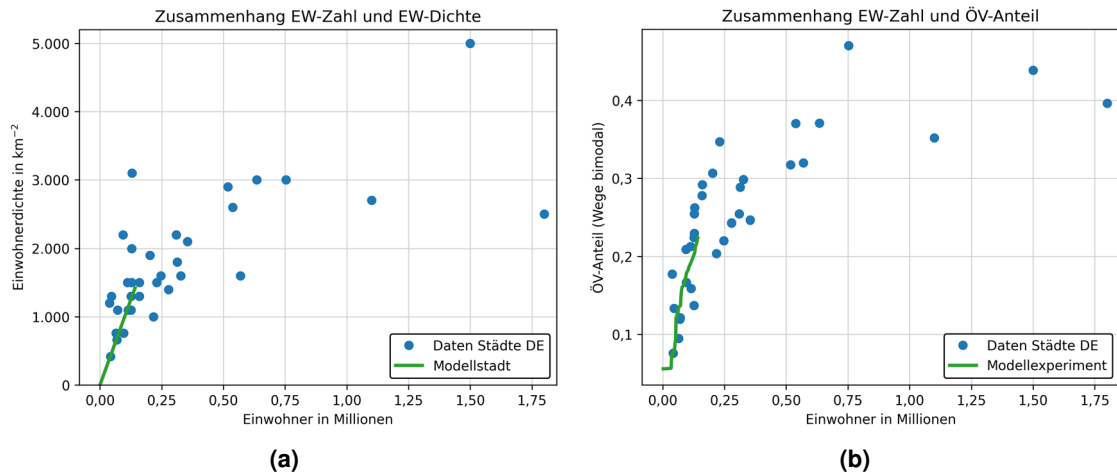


Abbildung 6.10: Einwohnerzahl-Einwohnerdichte-Zusammenhang der Modellstadt (a) und Zusammenhang zwischen Einwohnerzahl und Modal Split (bimodaler Modal Split des motorisierten Verkehrs) aus den Modellergebnissen (b) im Vergleich mit deutschen Städten.

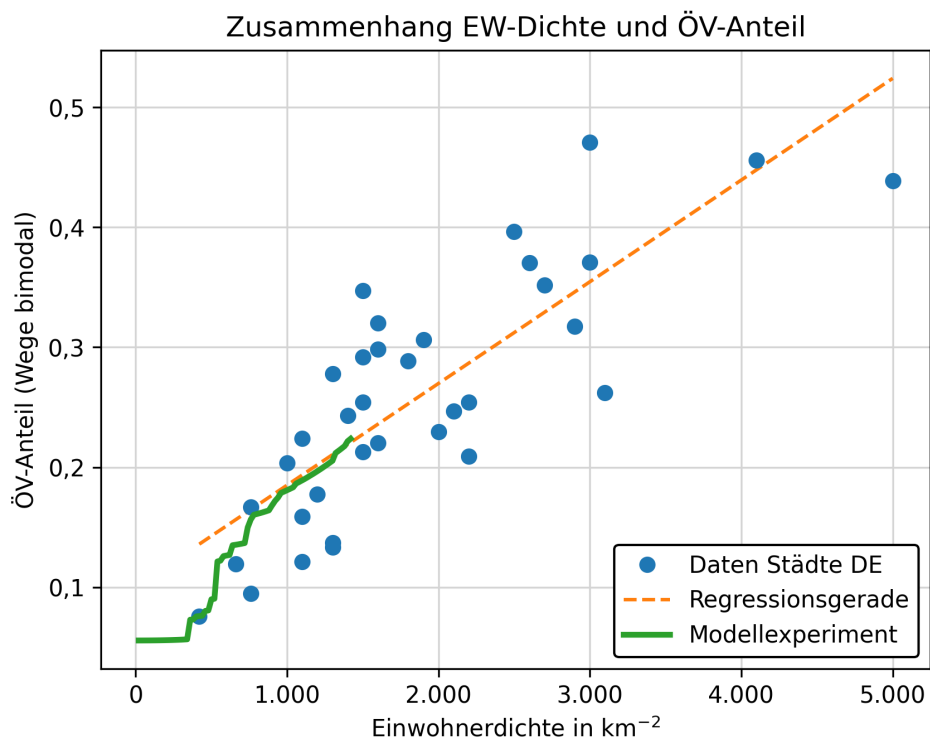


Abbildung 6.11: Zusammenhang zwischen Einwohnerdichte und Modal Split (bimodaler Modal Split des motorisierten Verkehrs) aus den Modellergebnissen im Vergleich mit deutschen Städten.

relevanten Bereich etwas stärker. Die Kurve der Modellergebnisse verläuft auch hier gut erkennbar durch die Punktwolke und nähert sich an die hier zusätzlich eingezeichnete Regressionsgerade an. Trotz stark vereinfachter Annahmen scheint das Modell also die Realität gut widerzuspiegeln und die verantwortlichen Wirkungszusammenhänge gut abzubilden.

6.6 Betrachtung zusätzlicher Varianten

Zusätzlich zur in Kapitel 4 spezifizierten Standardvariante wurde die Untersuchung des Modellverhaltens mit Taktanpassung für weitere Varianten betrachtet:

- a) Die zentrale Ost-West-Linie 3 zu den Nachfrageschwerpunkten im Nordwesten und im Südosten verlängert (Siehe Abbildung 6.12a), um die Linie 1 bei der Anbindung dieser Nachfragezentren zu entlasten. Dadurch entstehen einige neue Direktverbindungen und auf den Relationen zwischen den drei Nachfrageschwerpunkten 101, 303 und 505 erhöht sich die Bedienungshäufigkeit. Außerdem entstehen neue Umsteigemöglichkeiten, da die neue Linie 3 an den Rändern des Netzes auf die Linien 1 und 2 trifft.
- b) Der ÖV wurde einmal kostenlos angeboten, einmal wurde der Fahrpreis verdoppelt. Beide Varianten des ÖV-Netztes wurden für diese beiden zusätzlichen Tarifvarianten und den Standardtarif betrachtet.

Mit dem geänderten Liniennetz und den geänderten Fahrpreisen wurde keine neue Zielwahl durchgeführt, sondern die Nutzenmatrix der Zielwahl unverändert aus der Standardvariante übernommen.

Abbildung 6.13 zeigt den Modal Split im Verlauf der Experimente im Variantenvergleich. Darin ist gut erkennbar, dass der kostenlose ÖV zu einer deutlichen Erhöhung des ÖV-Anteils führt und der stark erhöhte Tarif zu einer Abnahme desselben. Auch das verbesserte Liniennetz sorgt aufgrund der unter Punkt a) zusammengefassten Verbesserungen für einen höheren Modal-Split, die Varianten mit dem erweiterten Liniennetz verlaufen immer leicht über den Varianten mit dem Standardnetz bei gleichem Tarif.

Die Modelle mit erweitertem Liniennetz erreichen eine höhere Einwohnerzahl, da hier die mögliche maximale Kapazität auf der kritischen Relation zwischen 101 und 303 verdoppelt ist. Dennoch wird nicht die doppelte Einwohnerzahl erreicht, da auch der ÖV-Anteil deutlich höher ist. Dies liegt einerseits am durch mehr mögliche Routen attraktiveren ÖV-Netz. Andererseits ist aufgrund der schon deutlich angestiegenen IV-Reisezeit der Anteil der „hinzukommenden“ Nachfrage, der den ÖV wählt, bei hohen Einwohnerdichten deutlich höher.

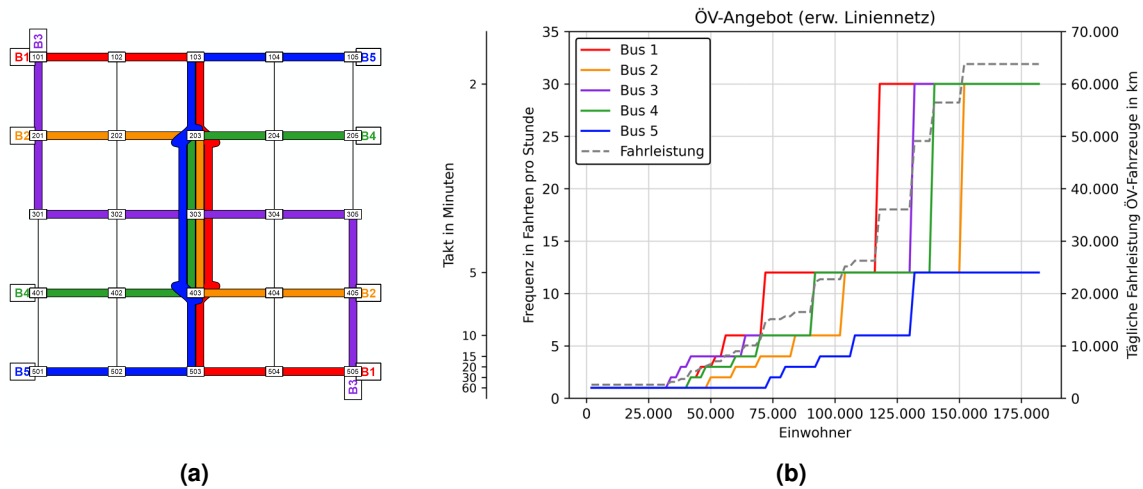


Abbildung 6.12: Modifiziertes Liniennetz mit verlängerter Linie 3 (a) und Entwicklung des Angebots je Linie für dieses Liniennetz in der Untersuchung mit Standardtarif (b).

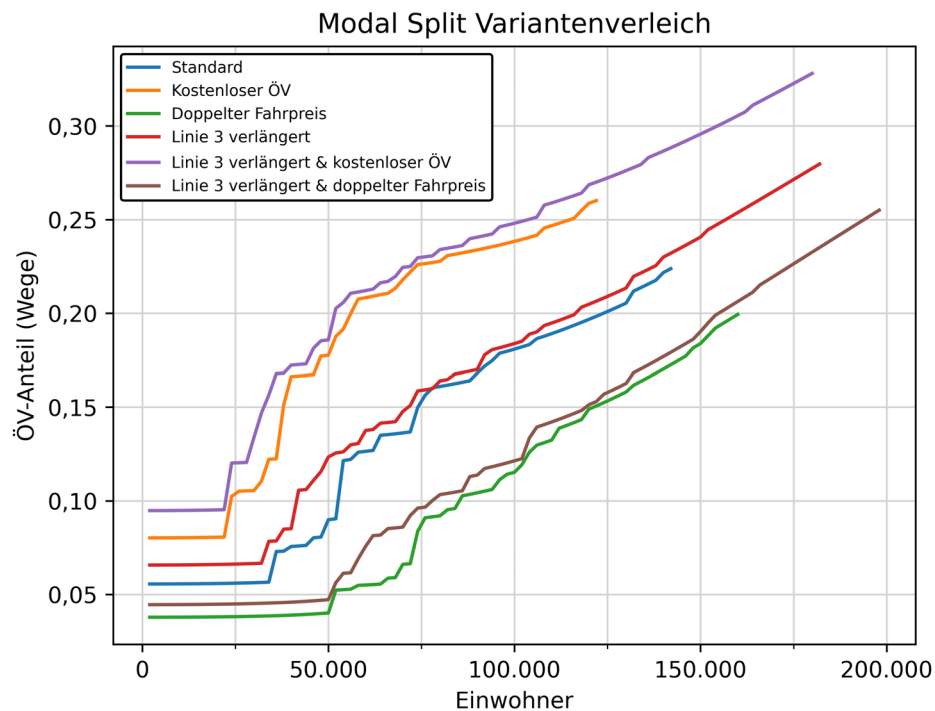


Abbildung 6.13: Entwicklung des Modal Split im Verlauf des Experiments für unterschiedliche Varianten des Modells.

Auch die Varianten mit teurerem Tarif erreichen im Vergleich zu den günstigeren eine höhere Einwohnerzahl. Durch den hohen Fahrpreis werden die Verkehrsteilnehmer von der Nutzung des ÖV „abgehalten“, was das Erreichen der Kapazitätsgrenze in Richtung der höheren Gesamtnachfrage verschiebt. Erkauft wird dies jedoch mit einem höheren IV-Anteil und den damit verbundenen negativen Umweltwirkungen sowie Reisezeitverlusten.

Nachdem der erste sprunghafte Anstieg im Modal Split zwischen den beiden Netzen mit jeweils gleichen Tarif noch weitgehend parallel erfolgt, entwickelt sich dieser in der Variante mit dem ergänzten Liniennetz zunächst stärker. Aus Abbildung 6.12 geht hervor, dass hier auch Linie 3 die ersten Angebotsverbesserungen erhält. Da durch die zahlreichen Umsteigemöglichkeiten mit Linie 3 damit deutlich mehr Relationen eine Verbesserung erfahren, erfolgt der Anstieg des ÖV-Anteils und in der Folge auch der weitere Angebotsausbau hier schneller als in den Varianten mit dem baumförmigem Standard-Liniennetz. Da in letzteren deshalb der IV-Anteil und damit der Anstieg der IV-Reisezeiten höher ist, nähern sich die Kurven im weiteren Verlauf des Experiments, in dem der Anstieg der IV-Reisezeiten zum maßgeblichen Treiber des ÖV-Anstiegs wird, wieder an.

6.7 Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit des ÖV

6.7.1 Kostendeckungsgrad

Abbildung 6.14 zeigt die Betriebskosten K und die Fahrgelderlöse E im Verlauf des Experiments. Als Verhältnis der beiden Größen ergibt sich der Kostendeckungsgrad φ , welcher ebenfalls in Abbildung 6.14 eingetragen ist:

$$\varphi = \frac{E}{K} \quad (6.2)$$

Der Kostendeckungsgrad gibt an, welcher Anteil der Betriebskosten durch die Fahrgelderlöse gedeckt wird. Steigt er über 1, wird Gewinn erwirtschaftet.

Die Betriebskosten sind eng mit der Fahrleistung verknüpft, die bereits in Abbildung 6.3 betrachtet wurde.

Im ersten Abschnitt des Experiments, in dem die Nutzerzahlen ansteigen, ohne dass dafür die Kapazität erhöht werden muss, steigt der Kostendeckungsgrad stetig an, und überschreitet in diesem Modell auch die Marke von 1. Erste nötig werdende Angebotsverdichtungen führen im folgenden Abschnitt zu Schwankungen des Kostendeckungsgrads im Bereich von ungefähr 1 bis 1,4: Durch die Angebotsverdichtungen steigen

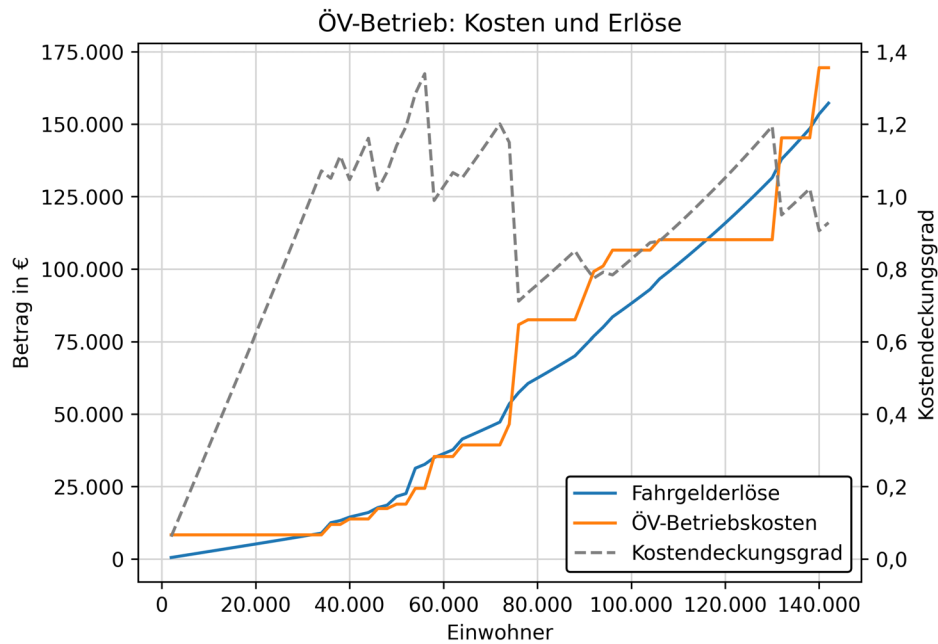


Abbildung 6.14: Entwicklung von Kosten und Erlösen des ÖV-Betriebs sowie des Kostendeckungsgrads.

einerseits die Kosten, andererseits kann in diesem Bereich durch die Taktverdichtungen auch der Modal Split gesteigert werden, was zu einem überproportionalen Anwachsen der Nutzerzahlen und somit der Erlöse führt, wodurch die ansteigenden Betriebskosten ungefähr kompensiert werden können. Im Bereich zwischen 70 000 und 100 000 fällt der Kostendeckungsgrad auf ein niedrigeres Niveau um 80 % zurück, da hier sehr aufwändige Angebotserweiterungen anfallen (unter Anderem der erste 2'-Takt auf Linie 1), deren Kosten nicht so schnell kompensiert werden können. Anschließend folgt eine Phase in der keine aufwändigen Angebotserweiterungen notwendig werden und der Kostendeckungsgrad mit den steigenden Nutzerzahlen wieder deutlich über 1 steigt. Mit den nächsten großen Aufwandssteigerungen durch zwei weitere Linien, die in den 2'-Takt wechseln, fällt der Kostendeckungsgrad erneut ab.

6.7.2 Betrachtung externer Nutzen

Die Untersuchung der Kosten und Erlöse hat gezeigt, dass der ÖV nicht immer kostendeckend betrieben werden kann, der Betrieb muss also mit öffentlichen Geldern bezuschusst werden. Gleichzeitig zeigt der Vergleich der IV-Reisezeiten in Abbildung 6.9b dass durch den ÖV bei höheren Einwohnerdichten das IV-Netz nennenswert entlastet wird, was zu einer erheblichen Zeitersparnis im IV führt. IV-Nutzer profitieren also von der Existenz des ÖV und auch von der verbesserten Angebotsqualität, wodurch sich

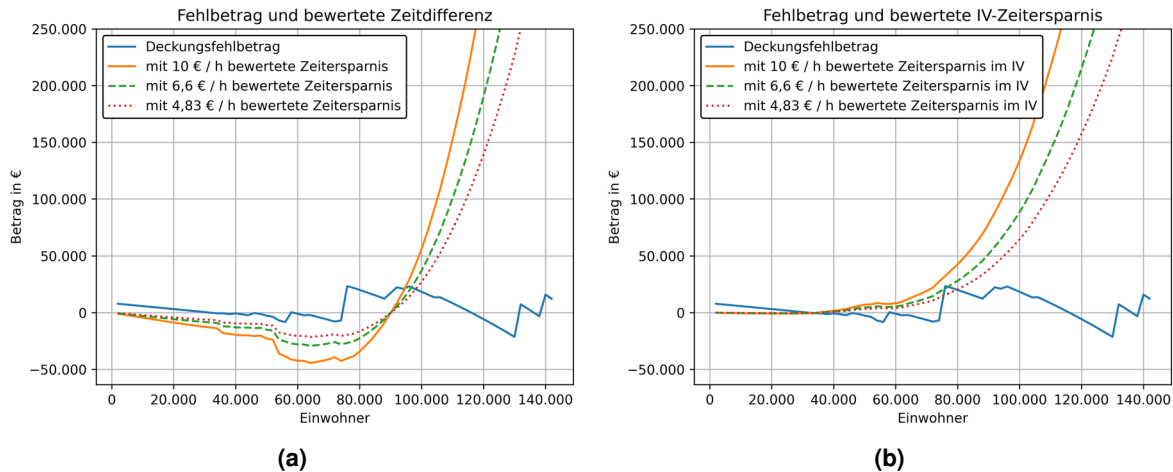


Abbildung 6.15: Täglicher Deckungsfehlbetrag des ÖV-Betriebs im Modell mit Angebotsanpassung und bewertete tägliche Reisezeitdifferenz zum Vergleichsfall ohne ÖV für die Gesamtnachfrage (a) bzw. bewertete Zeitersparnis nur im Modus IV (b).

diese Finanzierung durch die Allgemeinheit prinzipiell rechtfertigen lässt.

Durch eine monetäre Bewertung dieser Zeitersparnis lässt sich aus den Modellergebnissen abschätzen, ab welcher Einwohnerdichte dieser Fremdnutzen den Verlust des ÖV-Betriebs wettmacht. Für die monetär bewertete Zeitersparnis werden drei Varianten gezeichnet: die Bewertung mit $10 \frac{\text{€}}{\text{h}}$ gemäß der verwendeten Nutzenfunktion, mit $6,6 \frac{\text{€}}{\text{h}}$ gemäß der *Standardisierten Bewertung 2016+* [18] und $4,83 \frac{\text{€}}{\text{h}}$ im Gesamtverkehr bzw. $4,66 \frac{\text{€}}{\text{h}}$ wenn nur Zeit im MIV betrachtet wird nach [19].

Es wird darauf hingewiesen, dass auf diese Auswertung besonders viele Modellannahmen einen großen Einfluss haben (CR-Funktion, Kapazität Straßennetz, Kostensätze ÖV-Betrieb, Tarifmodell, Moduswahl, ...). Die ermittelten Zahlenwerte sind dementsprechend mit großer Vorsicht zu betrachten.

Für den ÖV-Betrieb wird der Deckungsfehlbetrag F betrachtet, der die Differenz zwischen Betriebskosten und Erlösen darstellt. Ist er positiv wird durch den Betrieb Verlust, ist er negativ Gewinn erwirtschaftet:

$$F = K - E. \quad (6.3)$$

Abbildung 6.15a zeigt den Deckungsfehlbetrag und die mit den genannten Zeitwerten bewertete Zeitersparnis gegenüber dem Vergleichsfall gänzlich ohne ÖV. Die Zeitersparnis ist zunächst negativ, da durch die längere Reisezeit im ÖV die durchschnittliche Reisezeit der Gesamtbevölkerung höher ist. Nach dieser Darstellung lohnt sich ab

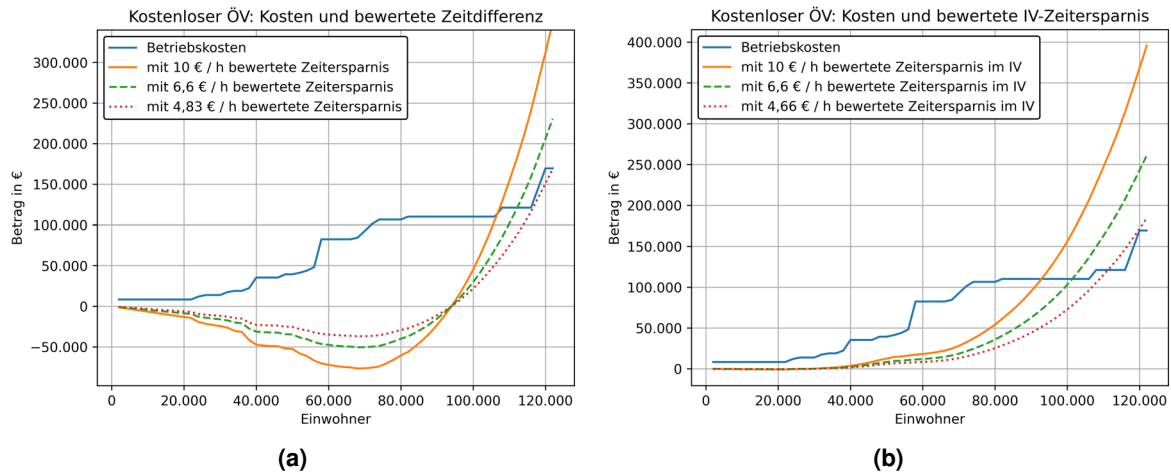


Abbildung 6.16: Tägliche Betriebskosten des kostenlosen ÖV im Modell mit Angebotsanpassung und bewertete tägliche Reisezeitdifferenz zum Vergleichsfall ohne ÖV für die Gesamtnachfrage (a) bzw. bewertete Zeiterparnis nur im Modus IV (b).

knapp 100 000 Ew im Modell ($1000 \frac{\text{Ew}}{\text{km}^2}$) der ÖV für die Gesamtgesellschaft, während er darunter Schaden anrichtet.

Die ÖV-Fahrgäste werden jedoch nicht von der Gesellschaft zur ÖV-Nutzung gezwungen, sie nutzen diesen, da er für sie persönlich die beste Alternative darstellt. Das heißt die ÖV-Fahrgäste haben durch die Nutzung des ÖV einen zusätzlichen persönlichen Nutzen, der mindestens so groß ist wie der Zeitverlust gegenüber dem IV. Daher sollte die Reisezeitverlängerung durch ÖV-Nutzung gegenüber dem „utopischen“ Vergleichsfall ohne ÖV-Angebot nicht negativ gewertet werden. Zur Bewertung ist deshalb nur die Zeiterparnis im IV zu betrachten. Diese ist (monetär bewertet) in Abbildung 6.15b dargestellt. Nach dieser Auswertung lohnt sich der ÖV für die Gesamtgesellschaft bereits ab etwas unter 40 000 Ew im Modell ($400 \frac{\text{Ew}}{\text{km}^2}$).

Die gleiche Untersuchung wurde auch für das Modell mit kostenlosem ÖV durchgeführt und in Abbildung 6.16 dargestellt. Demnach lohnt sich ein kostenloser ÖV gesamtgesellschaftlich ab 94 000 bis 112 000 Ew im Modell (940 bis $1120 \frac{\text{Ew}}{\text{km}^2}$) gegenüber der Situation ganz ohne ÖV.

Die Verbesserung der IV-Reisezeiten durch ÖV-Nutzung als externer Nutzen wurde hier aufgrund der Verfügbarkeit im Modell und der vergleichsweise einfachen Monetarisierung als externer Nutzen des ÖV-Angebots ausgewählt und den ÖV-Kosten gegenübergestellt. Daneben gibt es weitere externe Nutzen, die sich aus der mit dem ÖV-Angebot verbundenen IV-Reduktion ergeben, beispielsweise die Verringerung von Unfallkosten, die Vermeidung von Lärm und Luftschadstoffen sowie die Einsparung von

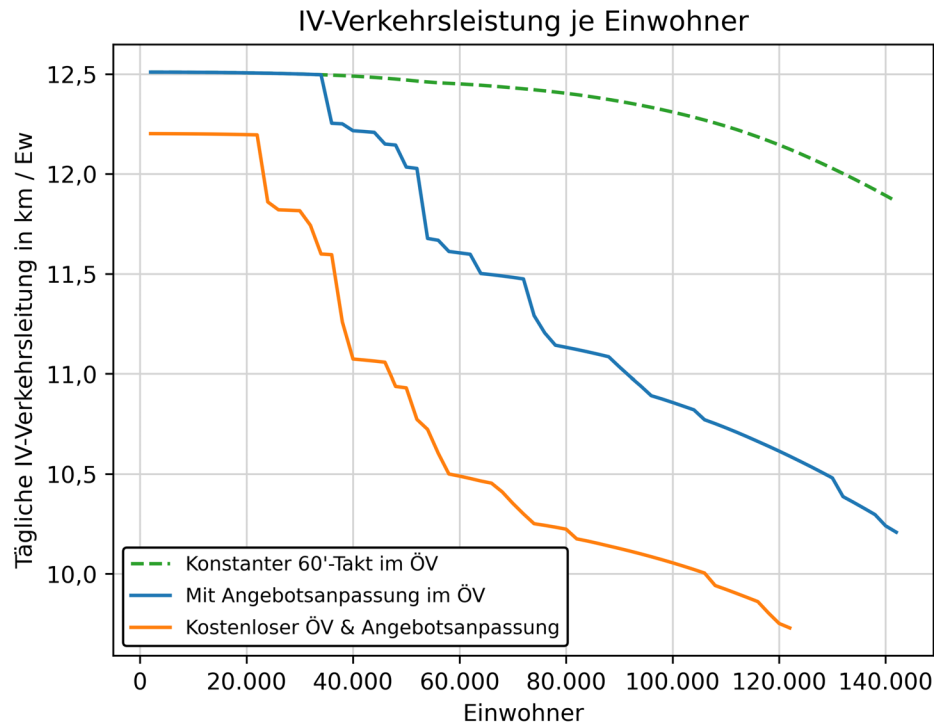


Abbildung 6.17: IV-Verkehrsleistung je Einwohner im Verlauf der Untersuchungen mit Angebotsanpassung in der Standardvariante sowie mit kostenlosem ÖV. Zum Vergleich der Verlauf in der Untersuchung ohne ÖV-Anpassung.

Energie.

6.8 Betrachtung der IV-Verkehrsleistung

Abbildung 6.17 zeigt die IV-Verkehrsleistung pro Einwohner für die Standardvariante mit Angebotsanpassung sowie im Vergleich den Vergleichsfall mit 60'-Takt und die Variante Angebotsanpassung und kostenlosem ÖV. Es zeigt sich, dass die IV-Verkehrsleistung pro Einwohner mit zunehmender Dichte abnimmt. Die Angebotsverbesserung durch dichtere Takte steigert diesen Effekt erheblich. Durch kostenlosen ÖV kann weitere IV-Verkehrsleistung eingespart werden.

6.9 Resümee

Das Modell bildet die formulierten Wirkungszusammenhänge, durch die die Dichte zu einem hohen ÖV-Anteil und zu einem verbesserten ÖV-Angebot führt, gut ab. Das Mo-

dell kann durchaus als Näherung an die Wirklichkeit gesehen werden, wie Abschnitt 6.5 zeigt.

Die Wechsel auf den 2'-Takt führen zu hohen Betriebsaufwänden im ÖV, die jedoch keiner entsprechend starken Steigerung der Angebotsqualität aus Nutzersicht (gegenüber einem 5'-Takt) gegenüberstehen. Hier werden in der Realität andere Wege der Kapazitätssteigerung verfolgt, z.B. Änderung der Gefäßgröße, Ergänzung des Liniennetzes durch alternative Linienführungen oder Wechsel auf ein leistungsfähigeres Verkehrssystem.

Abschnitt 6.6 zeigt, dass ein vermaschtes Liniennetz mit gegenüber einem einfachen strahlenförmigen Netz mehr Umsteigemöglichkeiten und mehr Direktverbindungen die Konkurrenzfähigkeit des ÖV erhöht und auch die Leistungsfähigkeit erhöhen kann.

Die maßgebliche Entlastung des IV sowie Einsparung von IV-Verkehrsleistung durch einen leistungsfähigen ÖV wird eindrucksvoll gezeigt, und auch dass diese gesamtgesellschaftlich betrachtet auch einen defizitären ÖV-Betrieb rechtfertigt. In Städten mit hoher Dichte kann auch ein kostenloser ÖV auf die Gesamtgesellschaft bezogen wirtschaftlich sein (Abbildung 6.16b).

7 Untersuchung des Modellverhaltens mit Takt- und Tarifierpassung

7.1 Idee der Untersuchung

Neben der zur Abwicklung der Verkehrsnachfrage notwendigen Kapazität und dem damit verbundenen Takt wirkt die Auslastung im ÖV auch darauf, zu welchen Fahrpreisen der ÖV angeboten werden kann. Günstigere Fahrpreise können die Moduswahl wiederum zugunsten des ÖV beeinflussen. Dieser Zusammenhang soll in dieser Überlegung zusätzlich betrachtet werden. Nicht betrachtet wird hingegen der Zusammenhang, dass die Fahrgeldeinnahmen auch darüber entscheiden, welche Bedienungshäufigkeit im Fahrplan angeboten werden kann. Stattdessen ergibt sich der Fahrplan in dieser Untersuchung komplett analog¹ zur Untersuchung mit Taktanpassung (Kapitel 6). Darauf aufbauend wird aus den Betriebskosten und den Nutzerzahlen anhand eines angestrebten Kostendeckungsgrades ggf. ein neuer ÖV-Tarif bestimmt. Während ein einmal verdichtetes Fahrplanangebot im Experimentverlauf nicht mehr zurückgenommen wird, kann sich der Fahrpreis in beide Richtungen ändern.

Abbildung 7.2 zeigt die in dieser Untersuchung abgebildeten Wirkungszusammenhänge. Abbildung 7.1 zeigt schematisch den Berechnungsablauf dieser Untersuchung.

Zur Durchführung dieser Untersuchung muss ein akzeptiertes Intervall an Kostendeckungsgraden sowie ein darin liegender angestrebter Kostendeckungsgrad angegeben werden. Liegt der Kostendeckungsgrad des aktuellen Modellzustands nicht im akzeptierten Bereich, so wird anhand der aktuellen Betriebskosten, des aktuellen Moduswahl-ergebnisses und des angestrebten Kostendeckungsgrades ein neuer Tarif berechnet.

Da sich bei sehr geringer Nachfrage dabei beliebig hohe Preise einstellen, die zu einem Scheitern der Moduswahlberechnung führen können, ist zusätzlich ein maximaler Fahrpreis notwendig, durch den die Tarife gedeckelt sind.

¹Übernommen wird der Mechanismus der Anpassung, nicht das Angebot bei bestimmten Einwohnerzahlen.

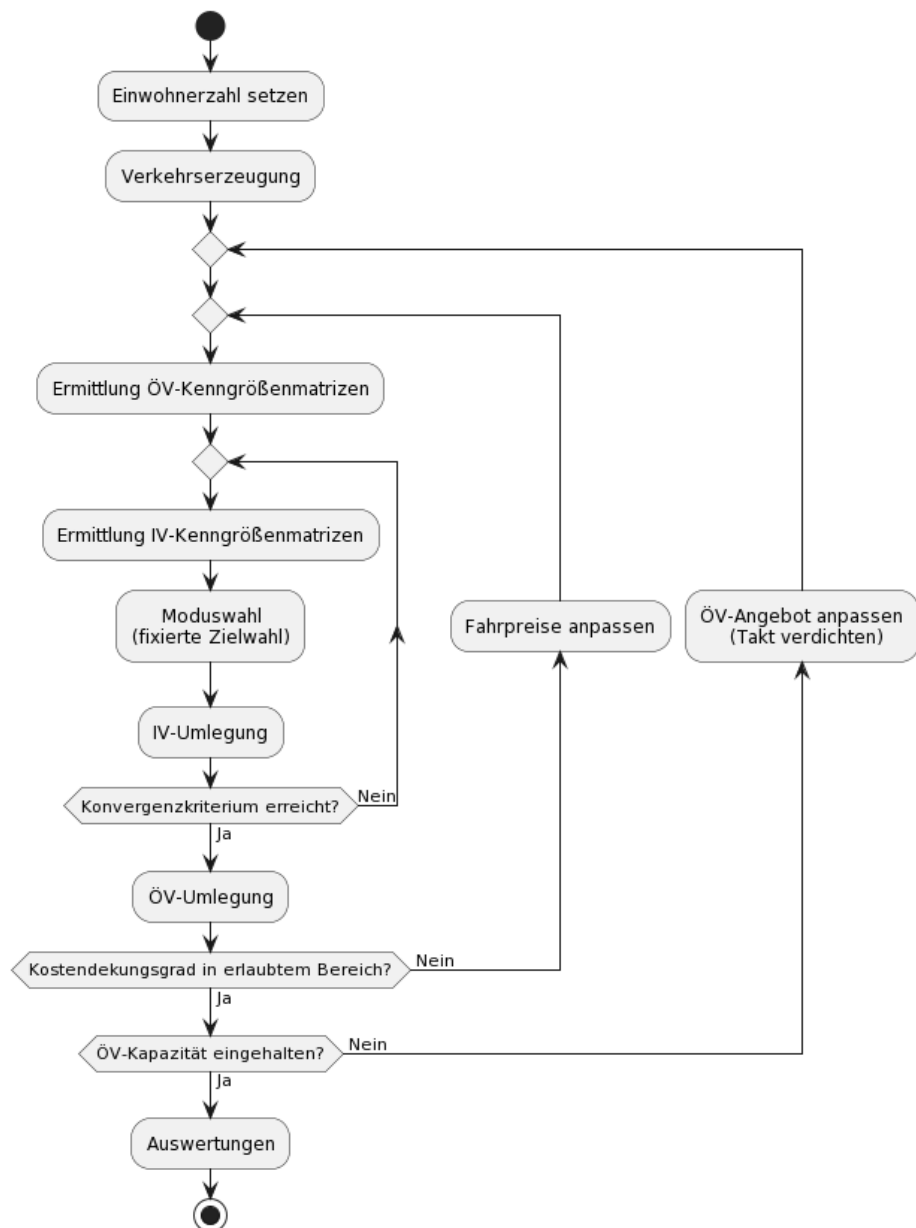


Abbildung 7.1: Prozessgraph des Berechnungsablaufs im Verkehrsmo-
dell für die Untersuchung mit Takt- und Tarifierfassung. Eigene Darstel-
lung.

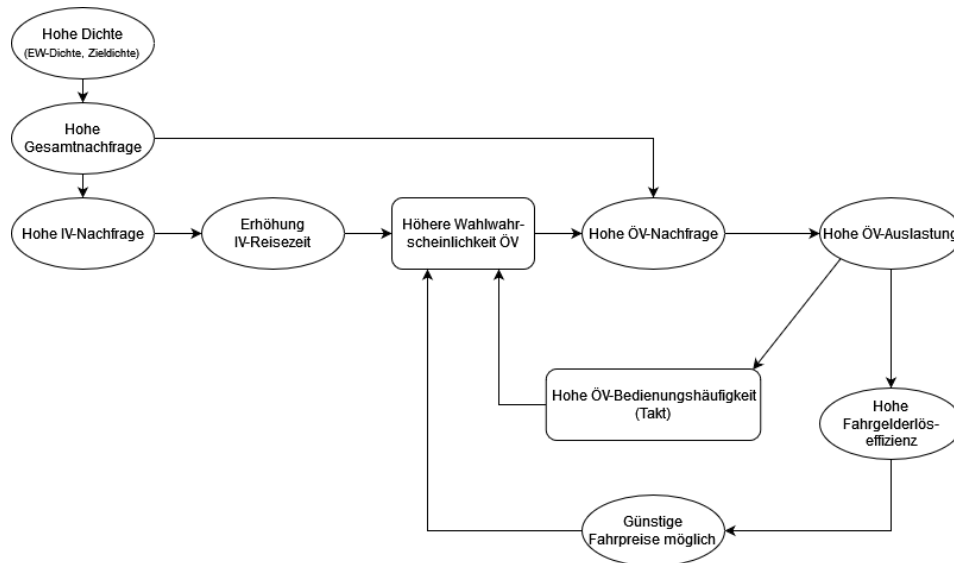


Abbildung 7.2: Wirkungszusammenhänge des Einflusses der Dichte auf ÖV-Anteil und ÖV-Angebot, wie sie in der Modelluntersuchung mit Takt- und Tarifierfassung berücksichtigt werden. Eigene Darstellung.

7.2 Problematik der Pfadabhängigkeit

Aufgrund der sehr geringen Nachfrage bei geringen Einwohnerzahlen ergibt sich dort als Tarif der Maximaltarif, der durch seinen hohen Fahrpreis stark von der Nutzung des ÖV abhält. Wird bei dieser Untersuchung in Analogie zur Taktanpassung der zuletzt gesetzte Tarif im Modell beibehalten, kommt es zu einer „Pfadabhängigkeit“, ein Gleichgewichtszustand abseits des systemoptimalen Zustands, der sich in Abhängigkeit des zur Prämisse gemachten vorherigen Ergebnis einstellt: Aufgrund des hohen Tarifs ist die ÖV-Wahlwahrscheinlichkeit bei der Moduswahl sehr gering, es stellt sich somit auch eine sehr geringe ÖV-Nachfrage ein. Somit müssen bei der Tarifbestimmung die vorhandenen Betriebskosten durch eine geringe Nachfrage geteilt werden, wodurch sich ein (weiterhin) sehr hoher Fahrpreis einstellt. Wäre der Fahrpreis geringer, würden sich hingegen deutlich mehr Personen für die Fahrt mit dem ÖV entscheiden, wodurch der geringere Fahrpreis auch möglich würde. Dies führt ggf. sogar zu deutlich höheren Einnahmen. Durch den hohen Tarif bei der initialen Moduswahl entsteht also eine Art *Dead-Lock-Situation*, die das Erreichen der optimalen Lösung verhindert. Diese ist *Pfadabhängig*, sie stellt sich nur ein, da einmal ein sehr hoher Tarif zur Moduswahl genutzt wurde.

Daher sollte der Tarif aus Untersuchungsergebnissen niedrigerer Einwohnerzahlen nicht für die Modellberechnung mit einer neuen Einwohnerzahl genutzt werden. Abbildung 7.3 vergleicht den Verlauf des Experiments bei einer solchen Berechnung mit

übernommenem Preis, und einem Modelldurchlauf bei dem der Ausgangstarif für die Berechnungen zu jeder Einwohnerzahl neu auf einen Minimalbetrag zurückgesetzt wurde. In einigen Bereichen liegen diese Kurven sehr nahe beieinander. Dies ist positiv zu werten, denn offenbar hängt der sich einstellende Fahrpreis nicht grundsätzlich immer vom Startwert ab. Es ist jedoch gut zu erkennen, dass bei der blauen Kurve mit vom letzten Modelllauf übernommenem Tarif an manchen Stellen der Fahrpreis länger auf einem hohen und der ÖV-Anteil auf einem niedrigen Wert verharret, obwohl sich ohne den beschriebenen Dead-Lock eine andere Lösung einstellen würde. Dieses Verhalten ist in dieser Untersuchung unerwünscht, da die unterschiedlichen Einwohnerzahlen bzw. Einwohnerdichten unabhängig voneinander betrachtet werden sollen. Daher wird im folgenden nur die Variante mit stets zurückgesetztem, niedrigen Startpreis verwendet.

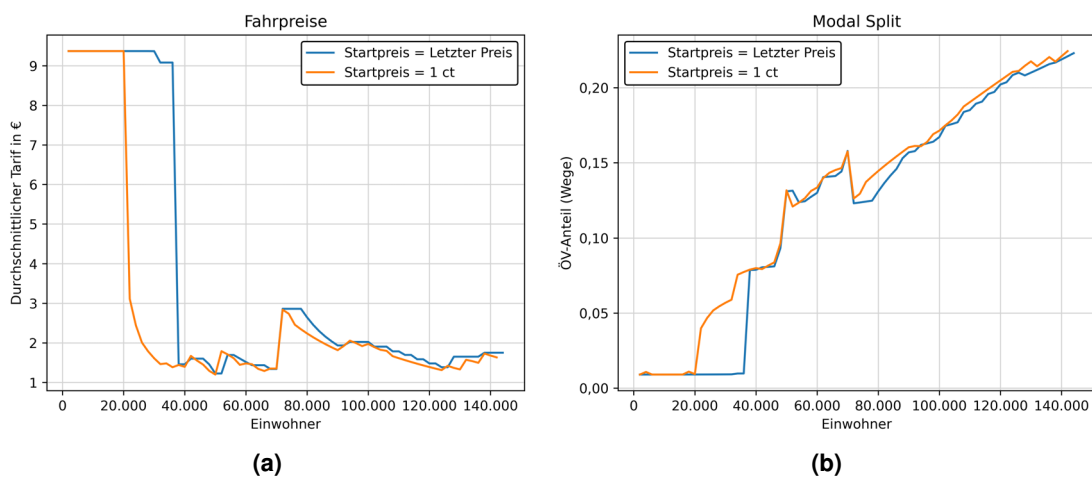


Abbildung 7.3: Vergleich des Modellablaufs mit Behalten des jeweils letzten Preises als Startpreis und mit Zurücksetzen des Preises auf einen niedrigen Ausgangspreis.

Für die weiteren Auswertungen wurden zwei Untersuchungen durchgeführt, einmal mit 95 % und einmal mit 70 % angestrebtem Kostendeckungsgrad. Der akzeptierte Bereich für den Kostendeckungsgrad waren jeweils ± 5 Prozentpunkte. Als Maximaltarif wurden 5 € für den Basisbetrag und $1 \frac{\text{€}}{\text{km}}$ für den Entfernungsabhängigen Anteil festgelegt.

7.3 Betrachtungen des ÖV-Angebots und des Tarifs

Abbildung 7.4 zeigt die Entwicklung der Fahrpreise, nach potentieller Nachfrage über die Relationen gewichtet, im Verlauf des Experiments für die beiden untersuchten Varianten

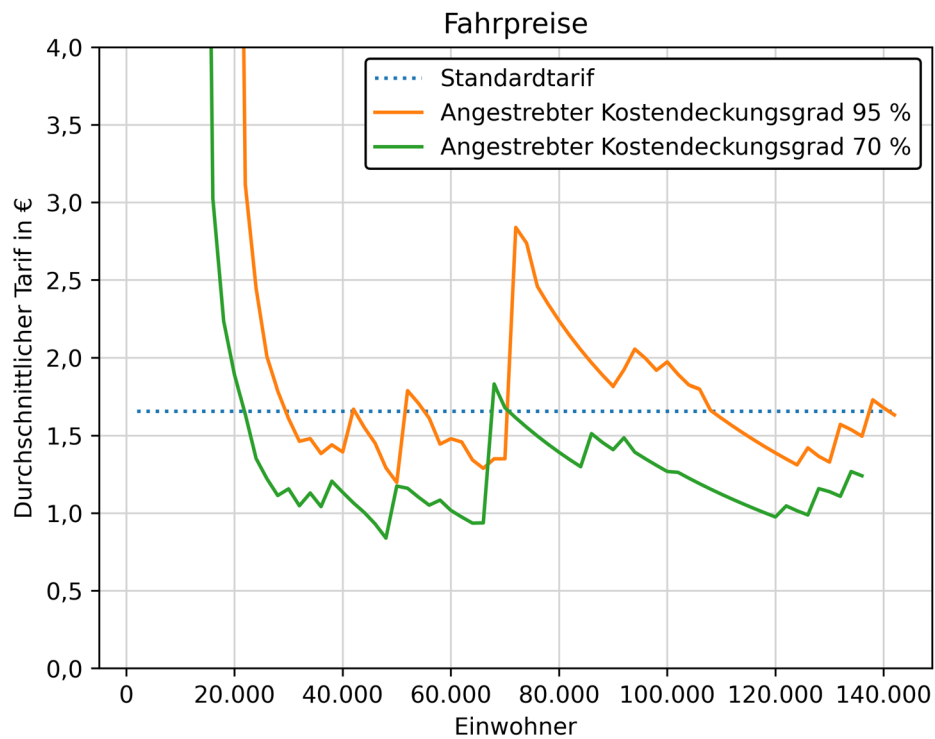


Abbildung 7.4: Verlauf der Fahrpreise (gemittelt nach potentieller Nachfrage) für die beiden Untersuchungen mit Tarifierfassung und im Vergleich zum in den übrigen Untersuchungen verwendeten Standardtarif.

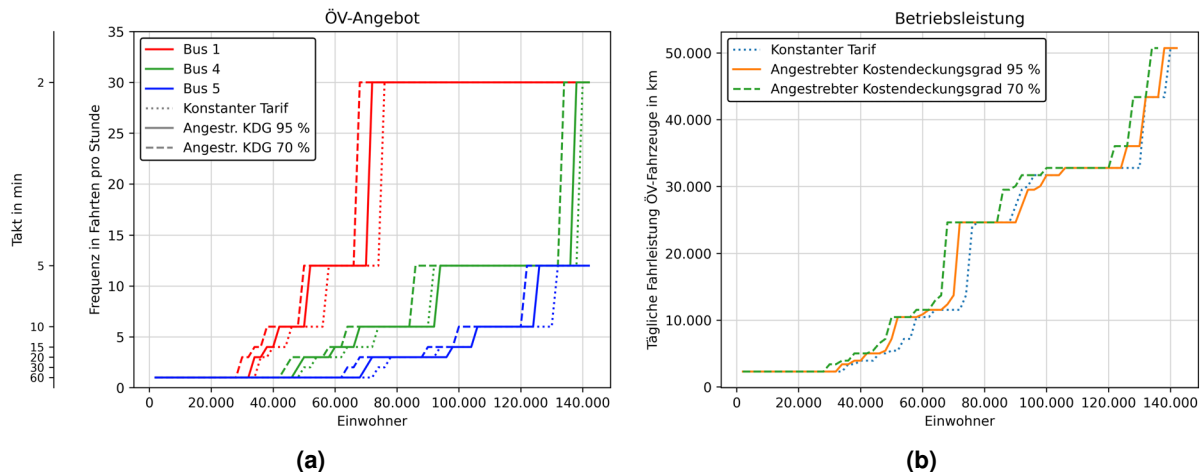


Abbildung 7.5: Vergleich der Entwicklung des ÖV-Angebots für die Untersuchung mit konstantem Tarif (Kapitel 6), sowie mit Tarifierfassung bei angestrebtem Kostendeckungsgrad von 95 % und 70 %. Dazu dargestellt die Frequenzen auf einigen Buslinien (a) sowie die Betriebsleistung als Indikator für die Summe des Angebots auf allen Linien (b).

mit Tarifierfassung und im Vergleich mit dem in den sonstigen Modelluntersuchungen hinterlegten Standardtarif. Im Bereich besonders geringer Einwohnerzahlen und somit Nachfrage befindet sich der Fahrpreis in beiden Varianten mit veränderlichem Tarif auf dem sehr hohen Niveau des maximal zugelassenen Tarifs. Die tatsächliche Höhe geht aus Abbildung 7.3a hervor und ist hier zur besseren Erkennbarkeit des übrigen Verlaufs nicht voll dargestellt.

Abbildung 7.5 zeigt die Entwicklung des ÖV-Angebots in den beiden Untersuchungen mit Tarifierfassung im Vergleich mit der Untersuchung ohne. Dabei ist in Abbildung 7.5a das Angebot auf den einzelnen, aus Gründen der Übersichtlichkeit nur dreien der fünf Buslinien dargestellt, 7.5b zeigt die Fahrleistung als Maß des gesamten Angebots.

Die Entwicklungen des Angebots sind vergleichbar, jedoch erfolgen die Angebotsausweitungen in der Variante mit 70 % angestrebtem Kostendeckungsgrad stets bereits bei etwas geringerer Einwohnerzahl als bei den anderen beiden Varianten. Aufgrund des niedrigeren Tarifs ist dort die realisierte ÖV-Nachfrage und somit auch die Auslastung größer. Die Angebotsausweitungen bei der Variante mit 95 % angestrebtem Kostendeckungsgrad erfolgen die Anpassungen meist etwas früher als bei der Variante ohne Tarifierfassung. Eine Ausnahme bildet das Intervall zwischen 80 000 und 110 000 Einwohnern. Hier liegt aufgrund der zuvor nötig gewordenen deutlichen Angebotsausweitungen und damit verbunden hohen Betriebskosten der Tarif über dem Standardtarif, weshalb sich hier ein geringerer ÖV-Anteil einstellt und die Auslastung gegenüber dem

Vergleichsfall geringer ist.

7.4 Betrachtungen des Modal Split und der Auslastung

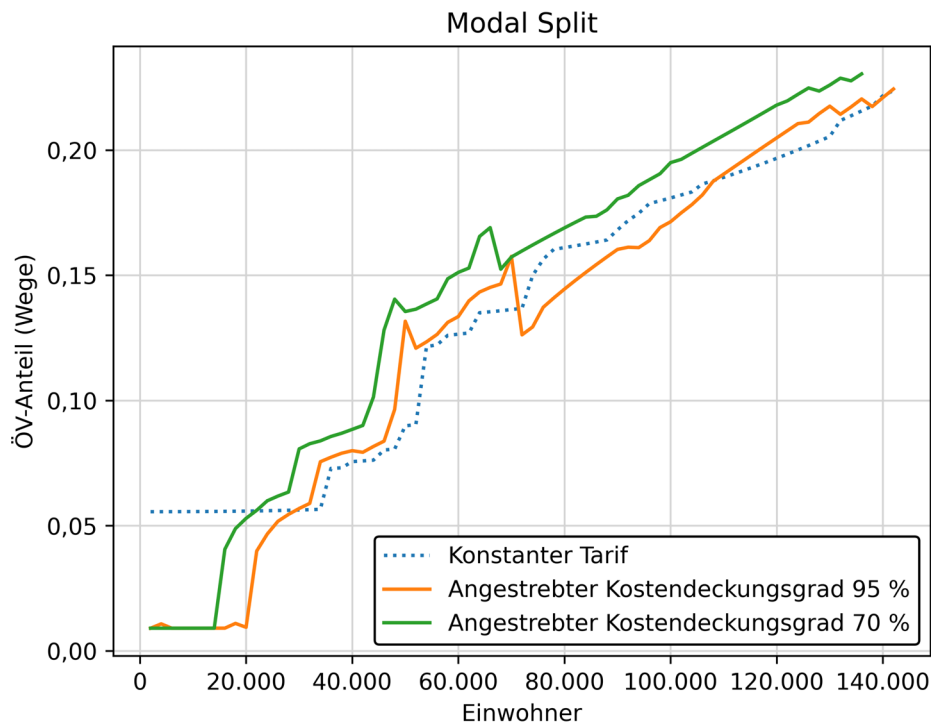


Abbildung 7.6: Vergleich des Modal Split aus den beiden Untersuchungen mit Takt- und Tarifierfassung mit der Untersuchung nur mit Taktanpassung.

Der Modal Split, dessen Zusammenspiel mit dem Tarif und dem ÖV-Angebot bereits thematisiert wurde, ist in Abbildung 7.6 dargestellt. Dabei sind wieder die Varianten mit den beiden angestrebten Kostendeckungsgraden mit der Untersuchung bei konstantem Tarif verglichen. Im Bereich besonders niedriger Einwohnerzahlen im Modell liegt der ÖV-Anteil in den Untersuchungen mit Tarifierfassung aufgrund des sehr hohen Fahrpreises auf sehr niedrigem Niveau. Sobald die Nachfrage ausreichend ist, um einen Fahrpreis unterhalb der Obergrenze zu ermöglichen, steigt der ÖV-Anteil sehr stark an, da niedrigerer Tarif und höhere realisierte Nachfrage sich gegenseitig verstärken (positive Rückkopplung). Der ÖV-Anteil der Untersuchung mit 70 % angestrebtem Kostendeckungsgrad liegt von da an stets über dem der Vergleichsuntersuchung mit konstantem Tarif. Der Modal Split der Untersuchung mit 95 % liegt hingegen näher an dem der Vergleichsuntersuchung und schneidet diesen gelegentlich.

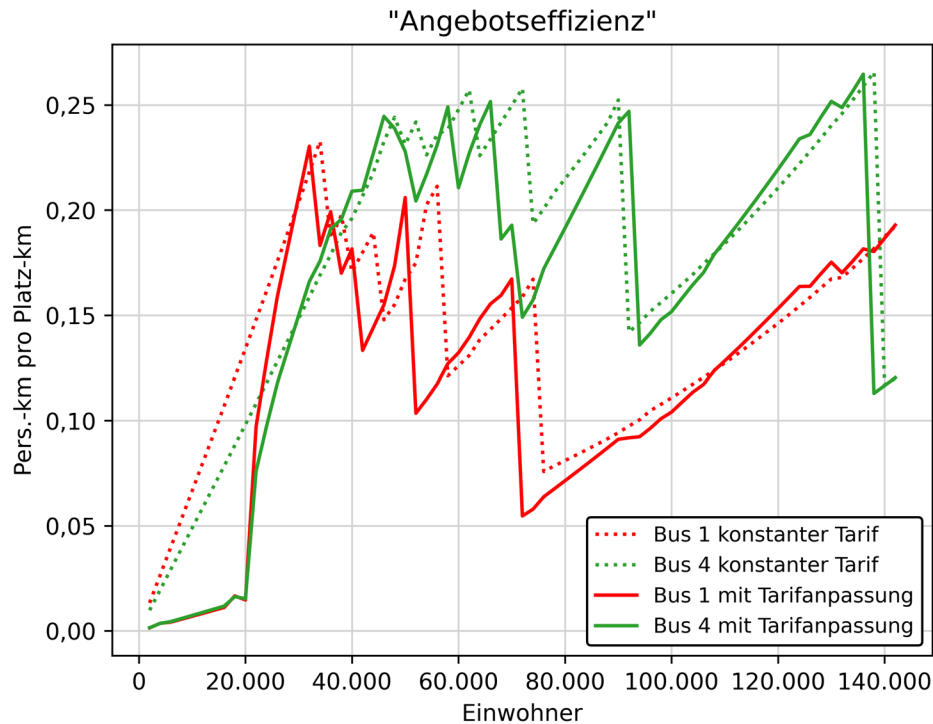


Abbildung 7.7: Vergleich des Verlaufs der „Angebotseffizienz“ (Personen-kilometer pro Platzkilometer) zweier Linien im Experiment mit 95 % angestrebtem Kostendeckungsgrad und im Experiment mit konstantem Tarif.

Anders als bei der Vergleichsuntersuchung erfolgt die Änderung des Modal Split mit der Einwohnerzahl nicht monoton, sondern weist Rücksprünge auf. Diese lassen sich auf gestiegene Fahrpreise zurückführen, die ihrerseits notwendige Taktverdichtungen zur Ursache haben. Trotz des besseren Fahrplanangebotes fällt somit auf das Gesamtnetz betrachtet zunächst der ÖV-Anteil. Die Rücksprünge fallen bei der Variante mit 95 % angestrebtem Kostendeckungsgrad größer aus als in der Variante mit 70 %, da hier aufgrund des höheren Kostendeckungsgrad auch der absolute Anstieg des Tarifs deutlich größer ausfällt. Mit weiter steigender Gesamtnachfrage erholen sich der Fahrpreis und der ÖV-Anteil wieder von diesem Rücksprung.

In Abbildung 7.7 sind als Maß für die Auslastung die „Angebotseffizienzen“ beispielhaft für zwei Linien aus der Untersuchung mit 95 % angestrebtem Kostendeckungsgrad dargestellt und mit der Untersuchung mit konstantem Fahrpreis verglichen. Im Vergleich ist zu erkennen, dass in der Untersuchung mit Tarifierfassung die Rückgänge bei Angebotsausweitungen stärker ausfallen, dafür die Anstiege auch etwas steiler verlaufen. Dies liegt an der durch die Angebotsausweitung notwendige Tarifierhöhung, die den ÖV-Anteil nach unten drückt und somit die Auslastung der nun mit großzügiger Kapazität verkehrenden Linie zusätzlich verringert. Mit weiterem Anstieg der Einwohnerzahl und

somit der Gesamtnachfrage erholen sich der Fahrpreis und damit auch der ÖV-Anteil wieder, was dazu führt dass die Auslastung schneller ansteigt als bei konstantem Tarif.

Außerdem ist erkennbar, dass durch die mit der Angebotsausweitung auf anderen Linien verbundene Tarifierhöhung die Auslastung auch an Stellen zurückgeht, an denen auf der betrachteten Linie selbst gar keine Angebotsausweitung stattfindet. Zu erkennen ist dies z.B. bei beiden Linien im Bereich zwischen 120 000 und 140 000 Einwohnern. Aufgrund der hier schon sehr hohen Gesamtnachfrage fallen die Tarifierhöhungen und somit auch die Auslastungsrückgänge hier jedoch recht gering aus. Deutlicher tritt der Effekt bei Linie 4 zwischen 60 000 und 80 000 Einwohnern auf. Dort erfolgt zunächst der Auslastungsrückgang aufgrund der Angebotsausweitung auf Linie 4 selbst, dann eine winzige Erholung und anschließend ein weiterer deutlicher Rückgang durch den Wechsel der Linie 1 in den 2'-Takt (und weiterer Angebotsausweitungen).

Ein weiterer auffälliger Unterschied ist der Verlauf zu Beginn des Experiments. Während die Auslastung bei festem Tarif kontinuierlich ansteigt, bleibt sie im Fall mit Tarifierfassung zunächst extrem niedrig und steigt dann sprunghaft an. Dies geschieht an der Stelle, an dem der Fahrpreis den festgelegten Höchstsatz unterschreitet, sich also erstmals der Tarif aus der Nachfrage und dem angestrebten Kostendeckungsgrad ergibt. Es gibt also hier einen klar erkennbaren Punkt, ab dem die Nachfrage groß genug ist, um das Angebot zu finanzieren, durch einen Fahrpreis den die Verkehrsteilnehmer dann auch bereit sind zu zahlen. Im konkreten Beispiel liegt dieser bei 20 000 Einwohnern. Diese Stelle ist auch in Abbildung 7.6 als Beginn des Anstiegs des Modal Split zu erkennen. Beim angestrebten Kostendeckungsgrad von 70 % erfolgt dieser Effekt dementsprechend bereits bei geringerer Dichte.

7.5 Betrachtungen des Kostendeckungsgrads

Abbildung 7.8 zeigt den Kostendeckungsgrad der beiden Untersuchungen im Vergleich mit der Untersuchung mit konstantem Tarif. Im Bereich besonders niedriger Dichten kann keine Variante einen akzeptablen Kostendeckungsgrad erreichen. Tatsächlich erreicht hier die Variante mit konstantem Tarif noch einen höheren Kostendeckungsgrad und somit auch höhere Einnahmen als die Varianten mit automatischer Tarifierfassung, die hier aufgrund der niedrigen Nachfrage den Tarif auf den zulässigen Höchstwert setzen. Auch übersteigt kurzzeitig der Kostendeckungsgrad der Variante mit Zielwert 70 % den der Variante mit Zielwert 95 %, da in der Fahrpreisberechnung mit niedrigerem Zielwert hier der Tarif bereits den Höchstwert unterschreitet und sich an dieser Stelle mit dem niedrigeren Fahrpreis erheblich mehr Nutzer gewinnen lassen. Im weiteren Ver-

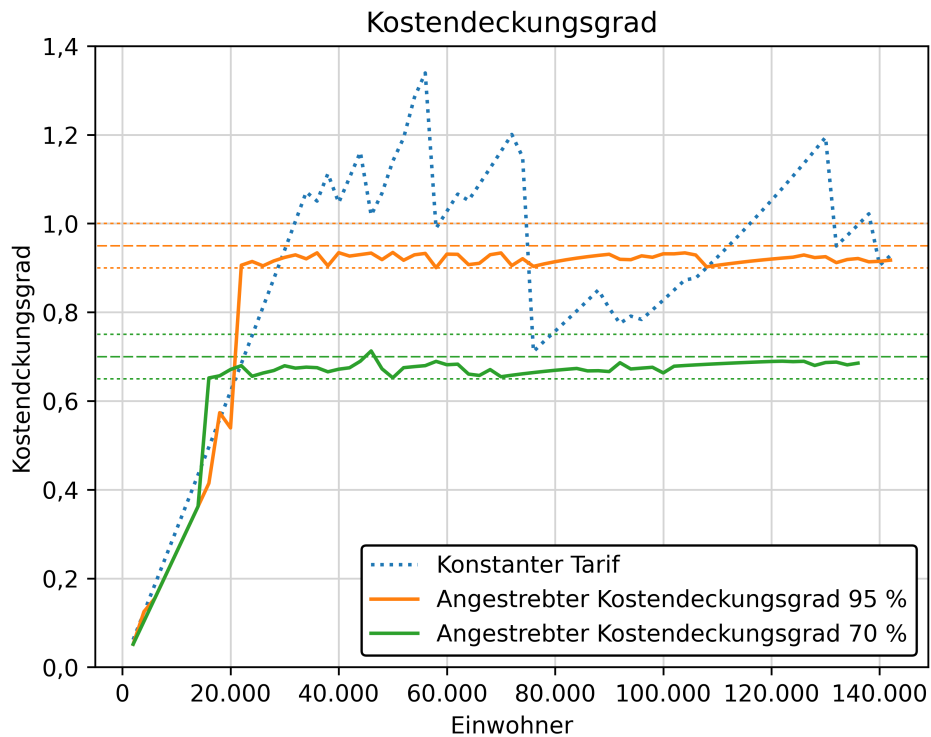


Abbildung 7.8: Vergleich der Entwicklung des Kostendeckungsgrads für die Untersuchung mit konstantem Tarif (Kapitel 6), sowie mit Tarifierfassung bei angestrebtem Kostendeckungsgrad von 95 % und 70 %. Die grob gestrichelten dünnen Linien in der entsprechenden Farbe kennzeichnen den angestrebten Kostendeckungsgrad, die fein gestrichelten die Grenzen des zugelassenen Bereichs.

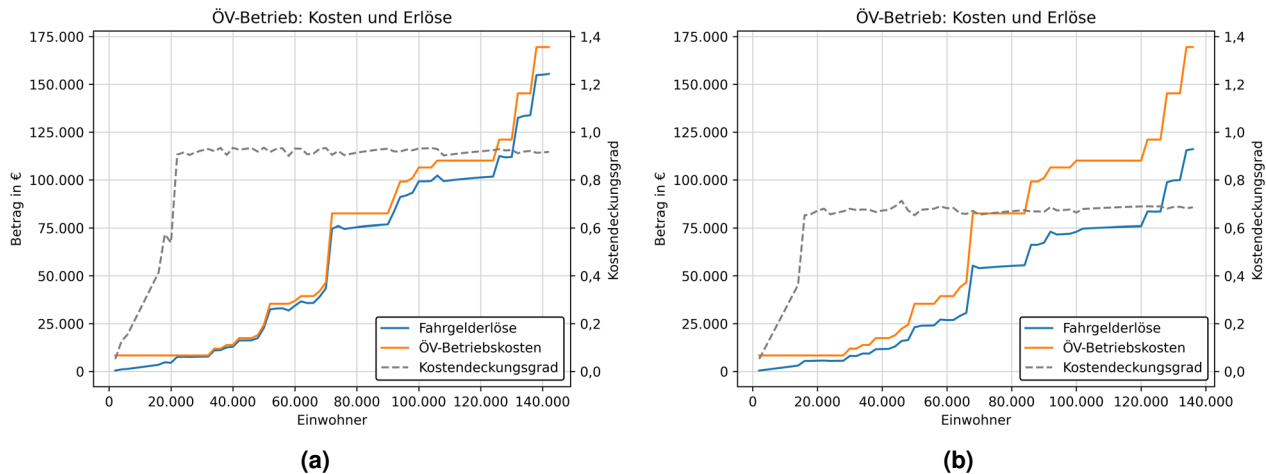


Abbildung 7.9: Entwicklung von Kosten und Erlös des ÖV-Betriebs sowie des Kostendeckungsgrad für die Untersuchungen mit Tarifierfassung auf einen angestrebten Kostendeckungsgrad von 95 % (a) bzw. 70 % (b).

lauf verlaufen die Kostendeckungsgrade der Untersuchungen mit Tarifierfassung mit dauerhaften leichten Schwankungen in der unteren Hälfte des zulässigen Bereichs. Der Zielkostendeckungsgrad wird dabei fast nie überschritten bzw. erreicht. In Abbildung 7.9 sind die Kosten und die Erlös des ÖV-Betriebs dargestellt, aus denen sich der Kostendeckungsgrad ergibt. Anders als in der Untersuchung mit konstanten Tarif (Abbildung 6.14) steigen die Erlös hierbei nicht die meiste Zeit mit ungefähr gleichbleibender Steigung an, sondern folgen stark gestuft dem Verlauf der Betriebskosten. An einigen Stellen sind hier beim Verlauf der Erlös auch kurzzeitige leichte Rückgänge zu erkennen. Ursächlich dafür sind an dieser Stelle stattfindende Tarifierhöhungen, wodurch sich die Nutzerzahlen gegenüber der Situation davor verringern. Trotz des höheren Fahrpreises sinken dabei die Gesamteinnahmen. Da der Zustand jedoch noch im Toleranzbereich des Kostendeckungsgrades liegt, wird er so beibehalten.

7.6 Betrachtung der IV-Verkehrsleistung

Abbildung 7.10 zeigt die IV-Verkehrsleistung pro Einwohner für die beiden Untersuchungen mit unterschiedlichem angestrebten Kostendeckungsgrad und der Untersuchung mit konstantem Tarif als Vergleichsfall. Wie bereits bei der Betrachtung des Modal Split zeigt sich, dass die Ergebnisse des Falls mit 95 % angestrebtem Kostendeckungsgrad nahe an denen des Vergleichsfalls liegen und sich die beiden Kurven gelegentlich schneiden. Die IV-Verkehrsleistung pro Kopf bei der Variante mit 70 % liegt dagegen stets unter der bei der Variante mit 95 % angestrebtem Kostendeckungsgrad.

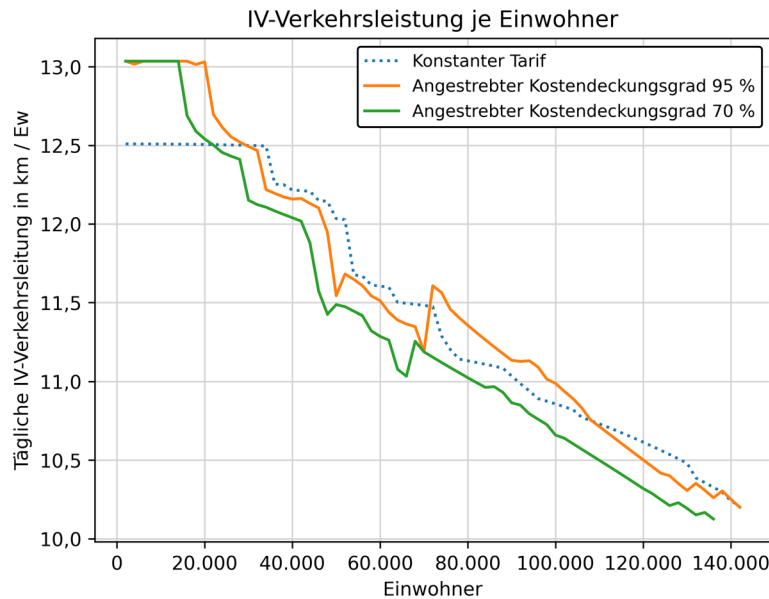


Abbildung 7.10: IV-Verkehrsleistung je Einwohner für die Untersuchungen mit Takt- und Tarifierfassung sowie den Vergleichsfall mit konstantem Tarif.

Durch die Akzeptanz eines niedrigeren Kostendeckungsgrades im ÖV und den damit verbundenen niedrigeren Fahrpreisen kann also IV-Verkehrsleistung eingespart werden.

7.7 Untersuchung Tarifierfassung bei konstantem Fahrplanangebot

Da die Entwicklung des Tarifs mit der Einwohnerzahl von den Effekten des sich ständig ändernden ÖV-Angebots überlagert wird, wurde zusätzlich eine Untersuchung der Tarifierfassung bei konstantem Fahrplanangebot durchgeführt, um die entsprechenden Effekte isoliert zu betrachten. Dafür wurden zwei unterschiedliche ÖV-Angebote betrachtet: In einem verkehrt die Linie 1 im 10'-Takt, alle anderen Linien im 20'-Takt. Im anderen verkehrt die Linie 1 im 5'-Takt, alle anderen Linien im 10'-Takt. Beide ÖV-Angebote wurden wieder für einen angestrebten Kostendeckungsgrad (a. KDG) von 70 % und von 95 % betrachtet. Für beide hier betrachteten ÖV-Angebote wurde außerdem ein Vergleichsfall mit dem Standardtarif gerechnet.

In den Diagrammen sind die Kurven zu den hier beschriebenen Untersuchungen ab der ersten Einwohnerzahl (im üblichen 2000er-Raster) eingezeichnet, ab der der Fahrpreis unter den festgelegten Maximaltarif fällt, und bis zur letzten Einwohnerzahl, bei

der die Kapazität noch eingehalten werden kann.

In dem jeweiligen Bereich, in dem Verkehrsangebot und Tarif jeweils „gültig“ sind, zeigen die untersuchten Varianten jeweils einen sehr starken Anstieg im Modal Split (Abbildung 7.11) und eine deutliche Reduktion des Tarifs (Abbildung 7.12a). Der Kostendeckungsgrad (Abbildung 7.12b) bleibt mit leichten Schwankungen ungefähr konstant, während er im Vergleichsfall mit festem Tarif mit (ungefähr) gleichbleibender Steigung und in glattem Verlauf zunimmt.

Es ist klar erkennbar, dass sowohl ein niedrigerer angestrebter Kostendeckungsgrad als auch ein geringerer Angebotsaufwand dazu führt, dass bereits bei niedrigeren Einwohnerzahlen bzw. -dichten ein vertretbarer Tarif entsteht (Beginn der jeweiligen Kurven). Das dichtere Taktangebot sorgt dagegen dafür, dass die Kapazität noch bei höheren Einwohnerzahlen eingehalten werden kann (Ende der jeweiligen Kurven).

Bei den Untersuchungen mit angestrebtem Kostendeckungsgrad von 70 % zeigt sich, dass der ÖV-Anteil beim 20/10'-Takts den des 10/5'-Takt bei gleichem Kostendeckungsgrad übersteigt. Aufgrund der hier deutlich geringeren Fahrpreise wird der ÖV hier also trotz schlechterem Taktangebot häufiger gewählt. Es ist jedoch auch erkennbar, dass sich die Kurven bei höheren Einwohnerzahlen schneiden (würden) bzw. hier gerade noch treffen. Durch die höhere Gesamtnachfrage verteilen sich dann die Mehrkosten des besseren Angebots „auf so viele Schultern“, dass für die Nutzer die Vorteile des dichteren Angebots überwiegen.

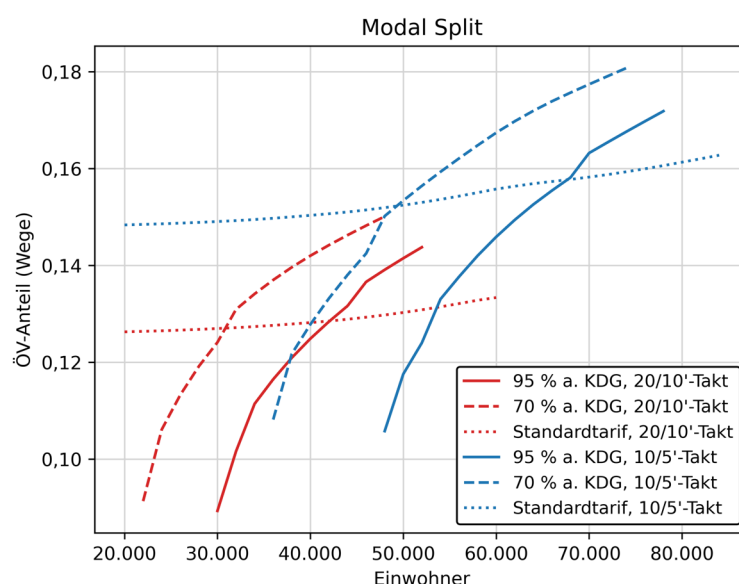


Abbildung 7.11: Entwicklung des Modal Split in den Untersuchungen mit konstantem Fahrplanangebot und Tarifierfassung sowie im Vergleichsfall ohne Tarifierfassung.

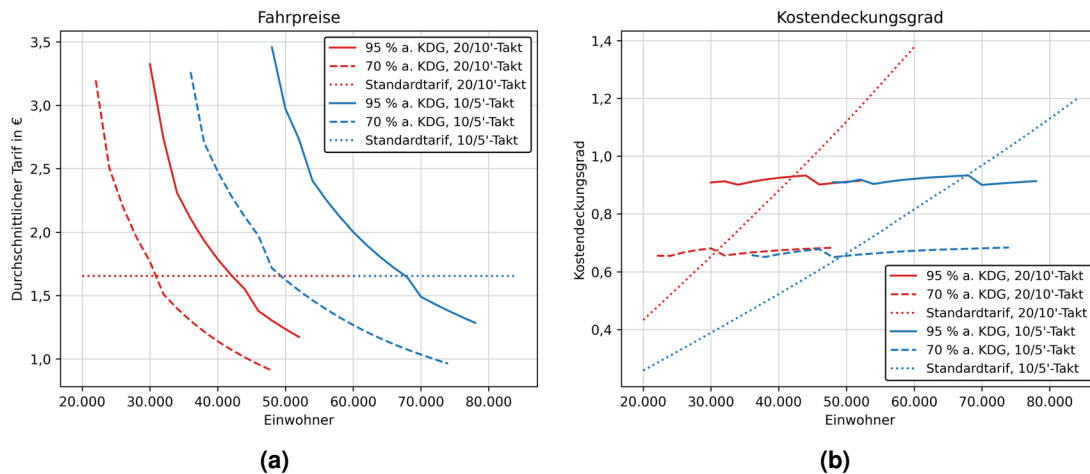


Abbildung 7.12: Entwicklung der Fahrpreise (a) und des Kostendeckungsgrads (b) in den Untersuchungen mit konstantem Fahrplanangebot und Tarifierfassung sowie im Vergleichsfall ohne Tarifierfassung.

7.8 Resümee

Bereits in den Abschnitten 6.2 und 6.7.1 wurde deutlich, dass bei der Kapazitätsausweitung des ÖV-Systems Sprungkosten auftreten. In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass dies zu einem Rückgang der ÖV-Nutzung führen kann, wenn diese direkt an die Nutzer weitergegeben werden. Die Akzeptanz eines geringeren Kostendeckungsgrades führt erwartungsgemäß zu niedrigeren Tarifen und einer höheren ÖV-Nutzung. In Bereich bestimmter „Schwellen“ kann dies zur Bereitstellung eines besseren ÖV-Angebots bereits bei geringeren Dichten führen.

Höhere Preise führen nicht zwangsläufig zu einer besseren Kostendeckung, insbesondere wenn sehr hohe Preise stark von der Nutzung abhalten. Durch einen niedrigeren angestrebten Kostendeckungsgrad lässt sich die eingesparte IV-Verkehrsleistung steigern.

Es ergibt sich durch die gewählte Preissetzungsstrategie eine klar erkennbare Dichte, ab der sich der ÖV „trägt“, in dem also die Nachfrage ausreicht, um einen dem Kostendeckungsgrad entsprechenden Fahrpreis zu ermöglichen. Diese Dichte hängt vom gewählten angestrebten Kostendeckungsgrad ab. Für 95% lag sie in diesem Experiment bei $200 \frac{\text{Ew}}{\text{km}^2}$. Zu beachten ist bei diesem Ergebnis, dass die Eigenschaften der Personengruppen und die Anbindung der Haltestellen im Hinblick auf städtische Räume festgelegt wurden. Es ist möglicherweise nicht ohne weiteres auf Räume geringer Dichte übertragbar.

Bei konstantem Angebot sorgt die mit der Dichte steigende Gesamtnachfrage für ge-

ringere Fahrpreise und damit für einen weiter steigenden ÖV-Anteil. Bei dieser Untersuchung zeigt sich auch, dass es (bei gleichem Kostendeckungsgrad) eine bestimmte Nachfrageschwelle gibt, ab der für die Nutzer ein (unabhängig von der Kapazität) verbessertes Angebot gegenüber der Kostenersparnis vorteilhaft ist, da die Mehrkosten auf eine ausreichend große Nutzerschaft aufgeteilt werden.

Der Wirkungspfad von hoher Dichte über hohe Auslastung zu niedrigen Fahrpreisen und Rückkopplung zur weiteren Erhöhung des ÖV-Anteils ist also grundsätzlich vorhanden, er wird jedoch eingeschränkt durch die nicht beliebig steigerbare Auslastung. Da die Bereitstellung einer höheren Kapazität mit höheren Kosten verbunden ist, wird dieser Effekt immer wieder von Sprungkosten unterbrochen.

8 Technische Umsetzung

8.1 Python

Python [20] ist eine vielseitig einsetzbare Programmiersprache. Sie eignet sich für die Erstellung komplexer Programme ebenso wie für einfache Skripte und ermöglicht es auch, mit der Programmumgebung *interaktiv* zu arbeiten, also einzelne Codeteile einzeln nacheinander einzugeben und auszuführen und dabei auf die Variablen von zuvor eingegebenen Codeteilen zuzugreifen. Darüber hinaus zeichnet sich Python durch die Verfügbarkeit zahlreicher ausgereifter Bibliotheken für wissenschaftliche Anwendungen und die Datenanalyse aus. Zu den wichtigsten gehören *NumPy* [21], *SciPy* [8], *matplotlib* [22] und *pandas* [23].

8.2 Die VISUM-COM-Schnittstelle

Die sogenannte *COM-Schnittstelle* (*Component Object Model*) ist eine WINDOWS-spezifische Technologie, um aus einem Programm auf die Objekte eines anderen Programms zugreifen zu können. VISUM erlaubt über diese COM-Schnittstelle einen Zugriff auf sein Objekt-Modell, das heißt auf im Programm angelegte Daten und Funktionen [24]. Dies erlaubt es, auf die Daten eines VISUM-Modells zuzugreifen und diese zu verändern, Abläufe zu automatisieren und eigene Funktionalitäten hinzuzufügen.

Über die COM-Schnittstelle kann zum einen aus einem externen Programm eine VISUM-Instanz gestartet und diese dann gesteuert werden, zum anderen können auch aus einer laufenden VISUM-Instanz Skripte gestartet werden. Letzteres kann manuell über das Menü oder als Verfahrensschritt im Verfahrensablauf erfolgen. Zudem ist es möglich, mit einer in VISUM integrierten interaktiven Python-Konsole interaktiv mit den aktuellen Objekten des VISUM-Modells zu arbeiten.

Durch die Möglichkeiten, die sich mit der COM-Schnittstelle bieten, kann VISUM effizient für „Nicht-Standardanwendungen“ verwendet werden und im Forschungskontext können neue Funktionalitäten hinzugefügt und ausprobiert werden, ohne dafür den Originalquellcode bearbeiten zu müssen.

Vom Hersteller sind insbesondere die Verwendung der Programmiersprachen Python und VBA explizit empfohlen, aber auch die Anbindung an andere Programmiersprachen ist möglich [24].

8.3 Modellzusammenbau

Der in Abschnitt 4.10 beschriebene automatische Modellaufbau ist durch ein Python-Skript realisiert. In der Skript-Datei muss der Pfad zu einer *Bauplandatei* angegeben werden, eine Textdatei, in der mehrere Dateinamen untereinander stehen. Diese Dateien müssen sich im gleichen Verzeichnis wie die Bauplandatei befinden.

Das Skript öffnet über die COM-Schnittstelle eine VISUM-Instanz und öffnet darin die in der ersten Zeile spezifizierte *.net*-Datei. Anschließend geht es die Bauplandatei zeilenweise durch und erkennt dabei anhand der Dateiendung, wie mit den Dateien zu verfahren ist:

- *.net*-, *.dmd*- und *.att*-Dateien werden additiv geladen,
- *.xml*-Dateien werden als Verfahrensablauf eingelesen,
- mit dem Inhalt von *.json*-Dateien werden netzweite Attribute gesetzt,
- *.py*- und *.vbs*-Dateien werden in der VISUM-Instanz als Skript ausgeführt,
- auf *.ver* endende Dateinamen lösen ein Speichern des Modells unter diesem Namen aus.

In der Skriptdatei können mehrere Dateipfade zu Bauplandateien spezifiziert werden, wodurch mit einer Skriptausführung mehrere Modellspezifikationen erstellt werden können.

In welche Bestandteile das Modell für die Anwendung in dieser Arbeit zerlegt wurde, ist in Anhang D.1 dokumentiert.

8.4 Variationsexperimente

8.4.1 Aufbau und Ablauf

In den Abschnitten 5.1, 6.1 und 7.1 wurden die Variationsexperimente vorgestellt, bei denen das gleiche Modell jeweils viele Male für unterschiedliche Einwohnerzahlen gerechnet wurde. Auch andere Parameter wurden teilweise automatisiert geändert. Dafür dient ein in Python geschriebenes Kontroll- und Auswerteskript, das eine angegebene

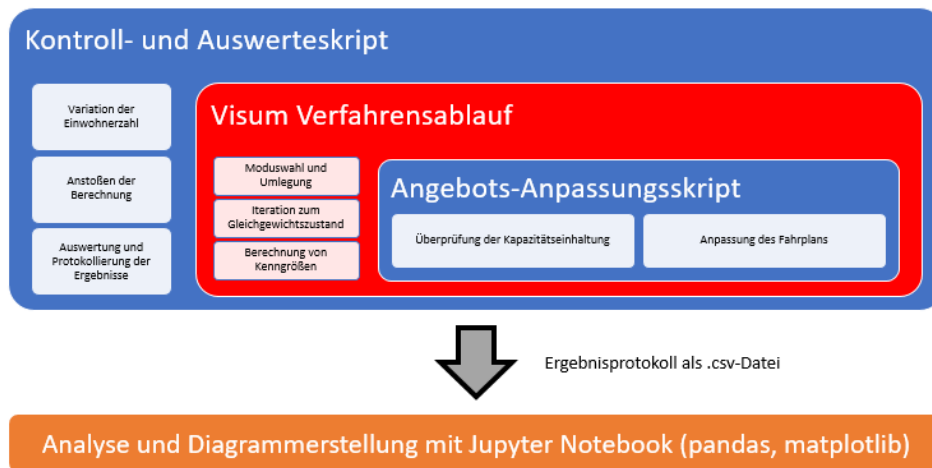


Abbildung 8.1: Hierarchische Organisation der Berechnungen und Aufgabenteilung zwischen Python-Skripten (blau), VISUM (rot) und interaktiver Jupyter-Umgebung (orange).

Visum-Datei öffnet, und in dieser nacheinander Attribute ändert und die Berechnung des Verfahrensablaufs anstößt.

Für die in 6.1 und 7.1 vorgestellten Experimente müssen dabei während der Verfahrensberechnungen Änderungen am Modell vorgenommen werden, die nicht mit VISUM-Verfahren alleine bewältigt werden können. Für diese dienen zwei Modellanpassungsskripte, einmal für das Fahrplanangebot und einmal für den ÖV-Tarif. Nach dem Berechnungsablauf werden vom Kontroll- und Auswerteskript Kenngrößen aus VISUM ausgelesen und aggregierte Kenngrößen aus Matrizen berechnet. Die Ergebnisse werden in einer .csv-Datei gespeichert. Abbildung 8.1 zeigt diese hierarchische Organisation der Berechnungen und die Zuordnung von Aufgaben zu den unterschiedlichen Programmteilen beispielhaft für die Untersuchung mit Angebotsanpassung (Kapitel 6).

8.4.2 Kontroll- und Auswerteskript

Im Kontroll- und Auswerteskript wird der Dateipfad für eine zu verwendende VISUM-Datei sowie für eine Ausgabedatei für die Ergebnisse angegeben.

Bei der Ausführung wird diese VISUM-Datei geöffnet, und dann mehrfach bestimmte Parameter im Modell explizit neu gesetzt, anschließend die Berechnung des Verfahrensablaufs angestoßen und danach die benötigten Werte aus dem Modell ausgelesen. In den Skripten für die Untersuchung ohne Angebotsanpassung (Kapitel 5) sowie einige Voruntersuchungen wird eine im Vorhinein festgelegte Anzahl an Konfigurationen in einer `for`-Schleife abgearbeitet. In den Skripten für die Untersuchungen mit Angebotsanpassung (Kapitel 6 und 7) wird stattdessen in einer `while`-Schleife eine Abbruchbe-

dingung geprüft, die sich auf die Ergebnisse der letzten Modellberechnung bezieht. Die Versionsdatei wird nach Durchlauf der Untersuchung nicht gespeichert. Es können in einem Skript Untersuchungen für mehrere Versionsdateien oder für geänderte Parameter definiert werden, die dann nacheinander durchgeführt werden.

Einige der zu protokollierenden Größen können aus dem VISUM-Modell einfach ausgelesen werden, andere werden im Skript berechnet. Dies wurde als weniger aufwändig erachtet als das Anlegen sämtlicher Formeln in VISUM selbst. Dazu werden auch ganze Matrizen aus VISUM ausgelesen. Mit dem Datentyp `array` aus dem Paket *NumPy* können die Matrizen einfach zwischengespeichert werden und elementweise sowie aggregierende Berechnungen mit ihnen durchgeführt werden.

Die ermittelten Kenngrößen werden schließlich in einer `.csv`-Datei gespeichert und können im Anschluss ausgewertet werden. Die `.csv`-Dateien sind so formatiert, dass sie auch mit der deutschsprachigen Version von *Microsoft Excel* geöffnet werden können.

8.4.3 Modellanpassungsskripte

Im Rahmen der Untersuchungen in den Kapiteln 6 und 7 müssen situationsabhängige Änderungen am Modell vorgenommen werden. Dazu dienen Modellanpassungsskripte, die aus dem Verfahrensablauf heraus aufgerufen werden. Eines dieser Skripte dient der Angebotsausweitung durch Taktverdichtung, wenn eine Linie überlastet ist, das andere der Anpassung des ÖV-Tarifs wenn der Kostendeckungsgrad nicht in einem gewünschten Bereich liegt. Beide Skripte prüfen selbst, ob diese Änderungen notwendig sind, und übermitteln an den Verfahrensablauf durch das Setzen eines benutzerdefinierten Attributs, ob sie Änderungen vorgenommen haben. Ist dies der Fall, so wird im Verfahrensablauf ein *Rücksprung* und somit ein weiterer Iterationsdurchlauf ausgelöst.

Angebotsanpassungsskript

Das Skript zur Angebotsanpassung bestimmt zunächst für alle Linien die Auslastung des am stärksten ausgelasteten Fahrplanfahrtelements. Dies muss vor der ersten Änderung des Angebots erfolgen, weil daraufhin alle Umlegungsergebnisse von VISUM automatisch gelöscht werden. Anschließend werden alle so ermittelten Werte für die Linien durchgegangen, und überprüft, ob diese Auslastungen über 1 liegen. Ist dies der Fall, wird das Angebot ausgeweitet. Dazu wird aus einer im Angebotsanpassungsskript hinterlegten Taktliste der nächste Takt ausgewählt. In welchem Takt die Linie bisher verkehrte, wird dem benutzerdefinierten Attribut *headway* der Linie entnommen. Ist dies bereits der letzte Takt in der Taktliste, wird dem Modell durch setzen eines benutzerde-

finierten Attributs mitgeteilt, dass das ÖV-Netz überlastet ist. Dieses dient dem Kontrollskript als Abbruchbedingung.

Ansonsten wird der nächste Takt aus der Taktliste übernommen und neu in das Attribut *headway* der betreffenden Linie geschrieben. Diese erhält daraufhin auch einen neuen Fahrplan. Dazu werden zunächst alle Fahrplanfahrten der Linie gelöscht, und ausgehend von einer im benutzerdefinierten Attribut *first_journey* der Linienroute festgelegten Zeit im Abstand des neuen Takts neue Fahrplanfahrten, bis einschließlich zur Zeit im Attribut *last_journey*, erzeugt. Fällt *last_journey* nicht genau in das Taktraster, ist die letzte im Raster liegende Fahrt vor diesem Zeitpunkt die letzte Fahrt. Anschließend wird noch für alle Fahrten im Netz die Fahrzeugkombination explizit gesetzt, da für einige Berechnungen die Definition einer Standard-Fahrzeugkombination je Linie offenbar nicht ausreichen ist.

Tarifanpassungsskript

Das Tarifanpassungsskript liest aus dem VISUM-Modell die Fahrgelderlöse und die Betriebskosten aus und berechnet daraus den aktuellen Kostendeckungsgrad. Liegt dieser nicht zwischen den beiden Grenzen des im Tarifanpassungsskript festgelegten akzeptierten Bereichs, wird ausgehend von der aktuellen Nachfrage ein neuer Fahrpreis berechnet. Dazu werden auch die aktuelle Nachfragematrix sowie die Luftlinienentfernungsmatrix aus dem Modell ausgelesen.

Aus dem angestrebten Kostendeckungsgrad (ebenfalls im Skript festgelegt und zwischen den beiden Grenzen liegend) und den ermittelten Betriebskosten werden die angestrebten Erlöse berechnet:

$$E_{\text{soll}} = \varphi_{\text{soll}} \cdot K. \quad (8.1)$$

Von diesem aus werden Werte für die Tarifparameter *PutFareBase* und *PutFareKm* so zurückgerechnet, dass diese mit der aktuell vorliegenden Nachfrage zum angestrebten Kostendeckungsgrad führen. Da es sich um zwei Parameter handelt, ist eine zusätzliche Zwangsbedingung notwendig. Dafür wird das Verhältnis der beiden Werte vorgegeben und dafür das Verhältnis des Standard-Tarifs gewählt:

$$r = \frac{\text{PutFareBase}}{\text{PutFareKm}} = \frac{1,00}{0,15} = 6,667. \quad (8.2)$$

Dieses Verhältnis ist ebenfalls im Tarifanpassungsskript festgelegt. Aus

$$E = \sum_{i,j} d_{ij}^{\text{PuT}} \cdot (\text{PutFareBase} + l_{ij}^{\text{DD}} \cdot \text{PutFareKm}) \quad (8.3)$$

und

$$\text{PutFareBase} = r \cdot \text{PutFareKm} \quad (8.4)$$

ergibt sich für die Rückrechnung:

$$\text{PutFareKm} = \frac{E_{\text{soll}}}{\sum_{i,j} d_{ij}^{\text{PuT}} \cdot (r + l_{ij}^{\text{DD}})} \quad (8.5)$$

PutFareBase ergibt sich dann gemäß (8.4). Die so erhaltenen Tarifparameter werden dann im Modell gesetzt, sofern sie nicht die ebenfalls im Tarifierfassungsskript festgelegten jeweiligen Höchstsätze überschreiten, ansonsten werden diese Höchstsätze als neue Tarifparameter gesetzt. Diese sind notwendig, um das Modell auch bei sehr geringer Nachfrage funktionsfähig zu halten.

8.4.4 Relationsfiltermatrizen

In einem Auswertungsschritt ist es gewünscht, den Modal Split auf unterschiedlichen Gruppen von Relationen getrennt zu untersuchen, in denen jeweils durch eine bestimmte ÖV-Linie eine Direktverbindung angeboten wird. So kann der Einfluss der unterschiedlichen Taktfrequenzen auf unterschiedlichen Linien auf den Modal Split auf unterschiedlichen Relationen untersucht werden. Für diese getrennten Untersuchungen werden *Relationsfiltermatrizen* genutzt, also Matrizen, die auf den Einträgen für der Gruppe angehörende Relationen eine 1, sonst eine 0 enthalten. Diese müssen zunächst für das aktuelle Liniennetz ermittelt werden.

Dazu wird vom aufrufenden Kontrollskript vor dem Durchführen der eigentlichen Variationsexperimente das VISUM-Modell geöffnet und darin ein Verfahrensablauf geladen, der nur die ÖV-Kenngrößenmatrix *Umsteigehäufigkeit* berechnet, wobei eine Option aktiviert ist dass nur *aktive Fahrplanfahrabschnitte* berücksichtigt werden sollen. Im Modell ist bereits eine Formelmatrix angelegt, die anhand der Umsteigehäufigkeits-Matrix eine solche Filter-Matrix der Direktrelationen errechnet:

$$M_{ij}^{\text{Filter}} = \begin{cases} 1, & n_{ij}^{\text{Tr}} = 0 \wedge i \neq j \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (8.6)$$

Dies geschieht in der Formelmatrix mit zwei geschachtelten IF-Statements.

Das Skript geht nun alle Linien im Modell durch und setzt einen Filter, der sicherstellt, dass nur ihre Fahrplanfahrabschnitte aktiv sind. Anschließend wird der Verfahrensablauf durchgeführt und die Filtermatrix in einem *NumPy*-array gespeichert.

Nachdem alle Linien durchgegangen wurden, wird die Visum-Instanz ohne Spei-

chern geschlossen und die Versionsdatei anschließend neu geöffnet. So wird der zuletzt bearbeitete Verfahrensablauf wiederhergestellt, und die eigentliche Experiment-Durchführung kann beginnen.

8.5 Hilfsskripte

Zwei Hilfsskripte erleichtern die Arbeit mit Modellen mit den hier verwendeten einfachen durchgehenden Taktfahrplänen. Sie wurden für den manuellen Aufruf aus dem VISUM-Skriptmenü geschrieben, können jedoch auch aus dem Verfahrensablauf, einem Kontrollskript oder dem Modellzusammenbauskript verwendet werden.

Das eine dieser Skripte setzt anhand eines im Modell bestehenden Fahrplanangebots die für das Taktanpassungsskript notwendigen benutzerdefinierten Attribute *headway*, *first_journey* und *last_journey* für alle Linien.

Das andere ändert für alle Linien den Fahrplan auf einen gleichmäßigen Taktfahrplan, wie beim Taktanpassungsskript durch Löschen und neu Anlegen aller Fahrten. Der Takt ist für alle Linien der gleiche und in der Skriptdatei festgelegt. (Dieses Skript orientiert sich dafür an den bestehenden ersten und letzten Fahrten einer Linie und nutzt nicht die von den anderen Skripten verwendeten Attribute. Eine diesbezügliche Änderung wäre jedoch problemlos möglich.) Auch dieses Skript setzt anschließend explizit die Fahrzeugkombination für alle Fahrten.

8.6 Datenauswertung

Zur Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse wurden die Python-Pakete *pandas* und *Matplotlib* genutzt. *pandas* stellt Datenstrukturen und Funktionalität zur effizienten Datenhaltung, Filterung, Sortierung und zum Zugriff auf „tabellenförmige“ Daten zur Verfügung. Hiermit wurden auch die *.csv*-Dateien eingelesen. *Matplotlib* ist eine Bibliothek zum Erstellen von Diagrammen, die durch ihre Bedienung mit Programmierbefehlen große Flexibilität ermöglicht.

Als Oberfläche diente eine *Jupyter-Notebook*-Umgebung. Dies ist eine Arbeitsumgebung zur interaktiven Benutzung von Python, die in einem Webbrowser dargestellt wird. Sie unterteilt den Code in *Zellen*, die nacheinander abgearbeitet, aber auch einzeln in beliebiger Reihenfolge ausgeführt werden können. Der Output, der neben Zahlen oder Text auch ein Diagramm oder eine Tabelle sein kann, wird direkt unter der Zelle angezeigt. So kann der Benutzer durch wiederholtes Ausführen und editieren einer Zelle interaktiv und iterativ seine Auswertungsroutinen verfeinern.

9 Fazit und Ausblick

Die Wechselwirkungen zwischen Verkehrsangebot, Verkehrsnachfrage und Raumstruktur sind äußerst vielfältig, und somit auch die Zusammenhänge zwischen der Einwohnerdichte und der ÖV-Angebotsqualität sowie des ÖV-Anteils. In Abschnitt 2.5 wurden einige dieser Effekte in einen Zusammenhang gebracht und als Kette von Wirkungen dargestellt. Zwischen dem ÖV-Anteil und dem ÖV-Angebot existiert dabei eine positive Rückkopplung. Eine hohe Einwohnerdichte führt nach diesen Überlegungen zu einem Anstieg von beiden.

Ein als zentral angesehener Wirkungspfad über die bei steigender IV-Nachfrage ansteigende IV-Reisezeiten sowie die bei steigender ÖV-Nachfrage und ÖV-Auslastung notwendigen Angebotsverbesserungen wurde im Verkehrsmodell abgebildet. Ein Zusammenhang zwischen einer hohen Einwohnerdichte und einem hohen ÖV-Anteil konnte anhand dieses Modells und auch in einer kleinen empirischen Datenanalyse gezeigt werden. Die Einwohnerdichte zeigt sich bei letzterer unter den drei möglichen Erklärgrößen Einwohnerzahl, Einwohnerdichte und Studierendenanteil als diejenige mit dem deutlichsten Zusammenhang zum ÖV-Anteil. Auch erweist sich der ÖV-Anteil als die von der Dichte am stärksten beeinflusste Modal-Split-Größe.

Die Modelluntersuchungen zeigen außerdem deutlich, dass ein leistungsfähiger ÖV einen wesentlichen Beitrag zum „Funktionieren“ von Städten hoher Dichte leistet. Er verhindert ein allzu starkes Ansteigen der IV-Reisezeiten und gewährleistet dadurch, dass das IV-Netz nutzbar bleibt. Darüber hinaus reduziert der ÖV die MIV-Verkehrsleistung und somit die negativen Umweltwirkungen des MIV, die sich in dichten Städten häufig in kritischem Ausmaß konzentrieren. Die durch den ÖV ermöglichten Zeitersparnisse im IV rechtfertigen auch einen defizitären ÖV-Betrieb. Die positiven Wirkungen des ÖV für eine Stadt können gesteigert werden, indem Liniennetze mit mehr Direktverbindungen und mehr Umsteigemöglichkeiten angeboten werden, oder/und der ÖV zu einem günstigeren Tarif oder ab einer gewissen Dichte auch kostenlos angeboten wird.

Die vorliegende Untersuchung an einem *fiktiven abstrakten Beispielmmodell* versucht, generelle Aussagen zu grundsätzlichen Zusammenhängen zu machen. Um die tatsächliche Stärke dieser Effekte zu untersuchen, sollten die Aussagen, insbesondere zu den Wirkungen des Fahrpreises, an kalibrierten Modellen überprüft werden.

Im Rahmen der Untersuchung wurde eine automatisierte Angebotsanpassung im ÖV vorgestellt und implementiert. Eine solche stellt eine Modellerweiterung dar, die beispielsweise für Modelle der Flächennutzungsplanung oder reine Prognosemodelle nützlich sein kann.

Aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen konnte eine Reihe von Effekten nicht im Rahmen dieser Arbeit im betrachteten Modell abgebildet werden. So wurde bereits in Abschnitt 2.5 beispielsweise der Parkdruck als weiterer Effekt von Dichte mit Auswirkung auf die Verkehrsmittelwahl genannt, der in den Modelluntersuchungen aus Komplexitätsgründen nicht miteinbezogen wurde. Auch wurden in Abschnitt 2.5 weitere Aspekte der ÖV-Angebotsqualität genannt, die ins Modell keinen Eingang fanden. In der Literatur [4, 25] wird für den Zusammenhang zwischen Dichte und Einwohnerzahl hauptsächlich die Anzahl der Einwohner im Einzugsbereich einer Haltestelle betrachtet, verbunden mit den Fragestellungen welcher Anteil der Bevölkerung einen schnellen Zugang zu einer Haltestelle hat und welche Zahl der Haltestellen und Linienlänge zur ÖV-Abdeckung der Bevölkerung notwendig ist. Diese Aspekte standen bei dieser Untersuchung nicht im Mittelpunkt.

Es ergeben sich also vielfältige Möglichkeiten, wie das bestehende Modell noch weiter verfeinert bzw. weitergehend genutzt werden kann:

- Unterschiedliches Angebot in HVZ und NVZ.
- Einführung zusätzlicher Linien:
Ab einer gewissen Taktdichte, z.B. 10'-Takt könnte es sinnvoll sein, bei Überlastung dieser Linie nicht einfach den Takt auf dieser weiter zu verdichten, sondern zunächst eine ergänzende Linie einzuführen, die auf der überlasteten Relation die überlastete Linie entlastet, gleichzeitig aber auch neue Direktverbindungen ermöglicht. Nachdem diese Linie dem Netz hinzugefügt wurde, kann die weitere Verdichtung wie gehabt erfolgen.
- Wechsel der Gefäßgröße (Standardbus, Gelenkbus) oder des Verkehrsmittels (Bus, Straßenbahn, U-Bahn) bei zunehmender Nachfrage.
- Untersuchung unterschiedlicher Grund-Liniennetze.
- Experiment, in dem von einer externen Optimierungsroutine, beispielsweise LINTIM [14], das ÖV-Angebot auf die aktuelle Nachfragesituation „maßgeschneidert“ wird.

- Kapazitätsbeschränkte Umlegung mit Diskomfort auf überlasteten bzw. stark belasteten Abschnitten. Dies kann Fahrgäste von der Nutzung hochausgelasteter Fahrten auf andere Verbindungen verlagern.
- Modellierung von Parkdruck.
- Rückwirkung der Verkehrssituation (IV-Reisezeiten, Parkdruck, ÖV-Angebot) auf den Motorisierungsgrad.

Für die Untersuchung der folgenden Aspekte sind hingegen grundsätzliche Änderungen an der Struktur des Modells erforderlich:

- Untersuchung unterschiedlicher Varianten an Zahl und Lage der Haltestellen (bzw. *Haltestellendichte*). Dazu muss der Zeitverlust durch zusätzliche Haltestellen im Fahrplan modelliert werden. Außerdem müssen Fußwege zu unterschiedlichen Haltestellenstandorten möglich sein, die feste Zuordnung von Verkehrszelle und Haltestelle muss damit aufgegeben werden.
- Gegebenenfalls in Verbindung damit ist die Auswirkung eines aus schnelleren (Express-) und langsameren Linien kombinierten Liniennetzes interessant.
- Modellierung des nichtmotorisierten Verkehrs als weitere alternative Modi. Auch der nichtmotorisierte Verkehr profitiert von der Dichte, insbesondere wenn diese mit Nutzungsmischung einhergeht. Umgekehrt ist er jedoch sensitiv auf die Stadtgestaltung und die negativen Auswirkungen des MIV, die bei höheren Dichten problematisch werden können.
- Rückwirkung des Verkehrssystems auf die Struktur der Landnutzung:
Während im betrachteten Modell die Verteilung der Strukturgrößen (Nutzungen) auf die Verkehrszellen immer nach dem gleichen Muster und die der Personengruppen immer gleichmäßig erfolgt, gibt es hier in der Realität Rückkopplungseffekte: Bestimmte Nutzungen und ÖV-affine Personengruppen siedeln sich gezielt an Orten mit guter ÖV-Erreichbarkeit an. So beeinflusst das Verkehrsangebot auch die Struktur der Nachfrage. Damit ergeben sich weitere Selbstverstärkungseffekte, auch im Hinblick auf die „Konzentration“ der ÖV-Nachfrage.

In den Modelluntersuchungen wurde der Ansatz verfolgt, unterschiedliche Einwohnerdichten dadurch Änderung der Einwohnerzahl einer Modellstadt bei gleichbleibender Fläche darzustellen. Dieser Ansatz hat die erwarteten Effekte unterschiedlicher Dichten im Modell gut gezeigt. Noch aussagekräftiger könnte es hingegen sein, eine feste

Einwohnerzahl auf unterschiedlich großer Fläche unterzubringen. Als Variationsexperimente wäre diese Untersuchung jedoch auch mit mehr Aufwand verbunden, da stärker die Grundstruktur des Modells im Sinne des Verkehrsnetzes und der Verkehrszellen verändert werden müsste.

Eine ebenfalls sehr interessante weiterführende Fragestellung für eine Untersuchung mit einem *fiktiven abstrakten Beispielmmodell* wäre es, nicht die Gesamtdichte sondern die räumliche Verteilung zu verändern, also die Skala *konzentriert vs. dispers* zu betrachten. Dies würde durch die Betrachtung von unterschiedlichen Anteilen und Anordnungen von dicht besiedelten, dünn besiedelten und unbesiedelten Flächen in einem Gebiet realisiert werden. Das betrachtete Gebiet sollte dabei eine zentrale Stadt und ihr Umland mit mehreren Vororten umfassen.

Eine hohe Dichte führt zwar zu einer geringeren Nutzungshäufigkeit des MIV je Einwohner, jedoch treten die negativen Wirkungen des MIV bei hohen Dichten deutlicher hervor. Darum sollten auch MIV-Restriktionen bei unterschiedlichen Dichten untersucht werden.

Es wurden also Wirkungspfade, durch die eine hohe Dichte zu einem hohen ÖV-Anteil und einer hohen ÖV-Angebotsqualität führt, identifiziert und ihre Existenz im Modell gezeigt. Dabei wurde außerdem deutlich, dass ein leistungsfähiges und attraktives ÖV-Angebot eine hohe Dichte *ermöglicht*. Dass es eine hohe Dichte auch *begünstigt* bleibt zu zeigen. Hierbei sind jedoch vielfältige Überlegungen aus der Stadtgestaltung, der Raumplanung und der Sozialforschung einzubeziehen. Auch ist Dichte nie der allein ausschlaggebende Faktor, maßgeblich ist unter anderem auch die räumliche Anordnung (Trennung oder Verflechtung) von unterschiedlichen Nutzungen. Diese bestimmt in erheblichem Maße, wie viele motorisierte Wege erzeugt werden und wie gut sie sich bündeln lassen [26]. Das Themenfeld bietet also Raum für zahlreiche weitere Untersuchungen.

Literatur

- [1] *Wikipedia: Bevölkerungsdichte*. zul. abgerufen 03.09.2022. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bev%C3%B6lkerungsdichte>.
- [2] Robert Cervero. *The Transit Metropolis*. Washington, D.C.: Island Press, 1998.
- [3] Werner Schnabel und Dieter Lohse. *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2: Verkehrsplanung*. 3. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth, 2011.
- [4] Jarrett Waker. *Human Transit*. Washington, D.C.: Island Press, 2012.
- [5] Jan Gehl. *Leben zwischen Häusern*. Berlin: jovis, 2012.
- [6] Agora Verkehrswende. *Städte in Bewegung. Zahlen, Daten, Fakten zur Mobilität in 35 deutschen Städten*. Berlin, 2020.
- [7] infas, DLR, IVT und infas 360. *Mobilität in Deutschland (MiD) 2017*. 2018. URL: www.mobilitaet-in-deutschland.de.
- [8] *SciPy*. URL: <https://scipy.org/>.
- [9] Markus Friedrich. *Verkehrsplanung und Verkehrsmodelle*. Skript, Universität Stuttgart. 2018.
- [10] Eric Pestel. „Qualität von Verkehrsnachfragemodellen“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2021.
- [11] Markus Friedrich u. a. *Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle*. Techn. Ber. 2019. URL: https://fops.de/wp-content/uploads/2021/02/FE-70_0919-2015-Anf-an-staedt-Verkehrsnachfragemodelle-Schlussbericht.pdf.
- [12] PTV AG. *PTV Visum 2021 Handbuch*. Karlsruhe, 2021.
- [13] Francesc Robusté. *Planning and Management of Transportation*. Vorlesung Universität Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2020.
- [14] *LinTim*. URL: <https://www.lintim.net/>.
- [15] Maximilian Hartl. „Integrierte ÖV-Planung – Entwurf, Vergleich und Bewertung von planerischen und algorithmischen Lösungsverfahren“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2020.
- [16] ADAC. *Kostenvergleich e-Fahrzeuge + Plug-In Hybride gegen Benziner und Diesel*. zul. abgerufen 09.08.2022. Apr. 2022. URL: <https://assets.adac.de/Autodatenbank/Autokosten/E-AutosVergleich.pdf>.
- [17] Umweltbundesamt. *Kraftstoffverbrauch*. zul. abgerufen 09.08.2022. Jan. 2022. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/kraftstoffe>.

- [18] intraplan GmbH; VWI GmbH. *Standardisierte Bewertung von Verkehrsweeinvestitionen im öffentlichen Personennahverkehr Version 2016+ Anhang 1: Datenvorgaben, Kosten- und Wertansätze*. Techn. Ber. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hrsg.), 2022. URL: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/standardisierte-bewertung-2016plus-anhang-1-datenvorgaben-kosten-und-wertansaetze.pdf?__blob=publicationFile.
- [19] Kay W. Axhausen u. a. *Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung*. 2015. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/BVWP/bvwp-2015-zeitkosten-pv.pdf?__blob=publicationFile.
- [20] *Python*. URL: <https://www.python.org/>.
- [21] *NumPy*. URL: <https://numpy.org/>.
- [22] *Matplotlib*. URL: <https://matplotlib.org/>.
- [23] *pandas*. URL: <https://pandas.pydata.org/>.
- [24] PTV AG. *Introduction to the PTV Visum COM-API*. Karlsruhe, 2014.
- [25] Christof Spieler. *Trains, Buses, People*. Washington, D.C.: Island Press, 2018.
- [26] Heinz Heineberg. *Stadtgeographie*. 3. Aufl. Paderborn: Schöningh, 2006.

A Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	direkte Entsprechung	Erläuterung/Übersetzung
'	Minute	
a. KDG	angestrebter Kostendeckungsgrad	
C	Car	Nachfragematrix des IV
COM	Component Object Model	Erläuterung in Abschnitt 8.2
EW / Ew	Einwohner	
EwC	Employees with Car	Erwerbstätige mit Pkw
EwoC	Employees without Car	Erwerbstätige ohne Pkw
Fzg	Fahrzeuge	
H	Home	Aktivität <i>Wohnen</i>
HVZ	Hauptverkehrszeit	
IV	Individualverkehr	in dieser Arbeit gleichbedeutend mit MIV verwendet
JRT	journey time	Reisezeit, Matrix der ÖV-Reisezeit
JT	journey time	Reisezeit
KDG	Kostendeckungsgrad	
MiD	Mobilität in Deutschland	Titel einer statistischen Untersuchung
MIV	motorisierter Individualverkehr	
MSC	mode-specific constant	konstanter modusspezifischer Nutzenbeitrag
NVZ	Nebenverkehrszeit	
O	Other	Aktivität <i>Sonstiges</i>
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr	
ÖV	öffentlicher Verkehr	in dieser Arbeit gleichbedeutend mit ÖPNV verwendet
OWT	origin waiting time	Startwartezeit
PG	Personengruppe	
PJT	perceived journey time	Empfundene Reisezeit, Matrix der Empfundenen Reisezeit

Abkürzung	direkte Entsprechung	Erläuterung/Übersetzung
Pkw	Personenkraftwagen	
PrT	private transport	Individualverkehr
PuT	public transport	Öffentlicher Verkehr, Nachfragematrix des ÖV
TTC	travel time (current)	aktuelle IV-Reisezeit im (belasteten) Netz, Matrix der IV-Reisezeit
W	Work	Aktivität <i>Arbeiten</i>

B Formelzeichenverzeichnis

φ	Kostendeckungsgrad	
ϕ_M	Modal-Split-Anteil (aufkommensbezogen) des Modus M	
${}^{\text{II}}\phi_M$	Bimodaler Modal-Split-Anteil (aufkommensbezogen) des Modus M	
ψ_M	Modal-Split-Anteil (leistungsbezogen) des Modus M	
ρ_{EW}	Einwohnerdichte	
ω_G	Anteil der Personengruppe G an der Gesamtbevölkerung	
β	Bewertungsfaktor/Skalierungsparameter	
β_{cost}	Bewertungsfaktor für Kosten	
β_{owt}	Bewertungsfaktor für die taktbedingte Startwarte-/Anpassungszeit	von engl. <i>origin waiting time</i>
β_{time}	Bewertungsfaktor für die Reisezeit/Empfundene Reisezeit	
c	Kosten	von engl. <i>cost</i>
c_{PrT}	Fahrtkosten im IV	
c_{PuT}	Fahrpreis im ÖV gemäß ÖV-Tarif	
C	Nachfragematrix des IV	von engl. <i>car</i>
C	Konstante	
$C_{\text{PrT}}^{\text{mode},G}$	konstanter modusspezifischer Nutzenbeitrag zum Modus IV für Personengruppe G	
d_{ij}^{PuT}	Matrizelement der ÖV-Nachfrage	von engl. <i>demand</i>
e	Eulersche Zahl	
E	Erlöse	
F	Deckungsfehlbetrag	
K	Kosten	
l	Streckenlänge/Entfernung	
l^{DD}	Luftlinienentfernung	von engl. <i>direct distance</i>
l^{IVD}	Fahrweite	von engl. <i>in-vehicle distance</i>

M_{ij}^{Filter}	Matrixelement der Filtermatrix	
N, n	Anzahl	
n^{Tr}	Anzahl Umsteigevorgänge	von engl. <i>number of transfers</i>
p	Wahrscheinlichkeit (entsprechend auch: Anteil)	
q	Belastung (einer Strecke)	
q_{max}	Kapazität (einer Strecke)	
r	Verhältnis	von engl. <i>ratio</i>
$R_{x,y}$	Korrelationskoeffizient zwischen x und y	
t	Zeit oder Zeitäquivalent	
t_0	Fahrzeit bei freiem Verkehrsfluss (im unbelasteten Netz)	
t^{AT}	Zugangszeit	von engl. <i>access time</i>
t^{ET}	Abgangszeit	von engl. <i>egress time</i>
t^{headway}	Fahrtenfolgezeit (Takt) im ÖV	
t^{IVT}	Fahrzeit im Fahrzeug	von engl. <i>in-vehicle time</i>
t^{JT}	Reisezeit (von Tür zu Tür)	von engl. <i>journey time</i>
$t_{\text{PrT}}^{\text{JT}}$	Reisezeit im IV	von engl. <i>journey time</i>
t^{OWT}	Startwartezeit	von engl. <i>origin waiting time</i>
$t^{\text{PJT}}, t_{\text{PuT}}^{\text{PJT}}$	Empfundene Reisezeit im ÖV	von engl. <i>perceived journey time</i>
t^{TWT}	Umsteigewartezeit	von engl. <i>transfer waiting time</i>
t^{WT}	Umsteigegezeit	von engl. <i>walking time</i>
Δt^{\pm}	Anpassungszeit	
T	Zeitraum	
U, u	Nutzen	von engl. <i>utility</i>
U_{PrT}	Nutzen im IV	
U_{PuT}	Nutzen im ÖV	
v_0	Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss	
w	Widerstand	

C Ergänzende Modelldokumentation

Tabelle C.1: Relative Verteilungsgewichte für die Strukturgrößen Wohnen, Arbeit und Sonstiges auf die Verkehrszellen. Die erste Ziffer der Zellennummer gibt überdies die „Zeile“, die letzte die „Spalte“ im Rasternetz an.

Zelle	Verteilungsgewicht		
	Wohnen	Arbeit	Sonstiges
101	5	1	1
102	1	1	1
103	1	1	1
104	1	1	1
105	1	1	1
201	1	1	1
202	2	2	1
203	2	2	1
204	2	2	1
205	1	1	1
301	1	1	1
302	1	2	1
303	1	10	20
304	2	2	1
305	1	1	1
401	1	1	1
402	2	2	1
403	2	2	1
404	2	2	1
405	1	1	1
501	1	1	1
502	1	1	1
503	1	1	1
504	1	1	1
505	1	5	1

Tabelle C.2: Relative Tagesganglinien für die Wege als Aktivitätenübergänge zwischen den Aktivitäten Wohnen (H), Arbeiten (W) und Sonstiges (O) sowie die sich ergebende Ganglinie der Gesamtnachfrage jeweils in Prozent.

Uhrzeit	H → W	W → H	H → O	O → H	Gesamtnachfrage
05:00 – 06:00	5,56	0	5,88	5,88	3,81
06:00 – 07:00	33,33	0	5,88	5,88	13,07
07:00 – 08:00	33,33	0	5,88	5,88	13,07
08:00 – 09:00	22,22	0	5,88	5,88	9,37
09:00 – 10:00	5,56	0	5,88	5,88	3,81
10:00 – 11:00	0	0	5,88	5,88	1,96
11:00 – 12:00	0	0	5,88	5,88	1,96
12:00 – 13:00	0	5,56	5,88	5,88	3,81
13:00 – 14:00	0	5,56	5,88	5,88	3,81
14:00 – 15:00	0	5,56	5,88	5,88	3,81
15:00 – 16:00	0	16,67	5,88	5,88	7,52
16:00 – 17:00	0	22,22	5,88	5,88	9,37
17:00 – 18:00	0	22,22	5,88	5,88	9,37
18:00 – 19:00	0	22,22	5,88	5,88	9,37
19:00 – 20:00	0	0	5,88	5,88	1,96
20:00 – 21:00	0	0	5,88	5,88	1,96
21:00 – 22:00	0	0	5,88	5,88	1,96

Tabelle C.3: Fahrplan der ersten Fahrten eines Tages je Linie und Richtung.

Haltestelle	Bus 1		Bus 2		Bus 3		Bus 4		Bus 5	
_01	5:00	5:58	5:01	5:37	5:00	5:30	5:27	4:51	5:58	5:00
_02	5:06	5:52	5:07	5:31	5:06	5:24	5:21	4:57	5:52	5:06
103	5:12	5:46							5:22	5:36
203	5:18	5:40	5:13	5:25			5:03	5:15	5:28	5:30
303	5:24	5:34	5:19	5:19	5:12	5:18	5:09	5:09	5:34	5:24
403	5:30	5:28	5:25	5:13			5:15	5:03	5:40	5:18
503	5:36	5:22							5:46	5:12
_04	5:42	5:16	5:31	5:07	5:18	5:12	4:57	5:21	5:16	5:42
_05	5:48	5:10	5:37	5:01	5:24	5:06	4:51	5:27	5:10	5:48

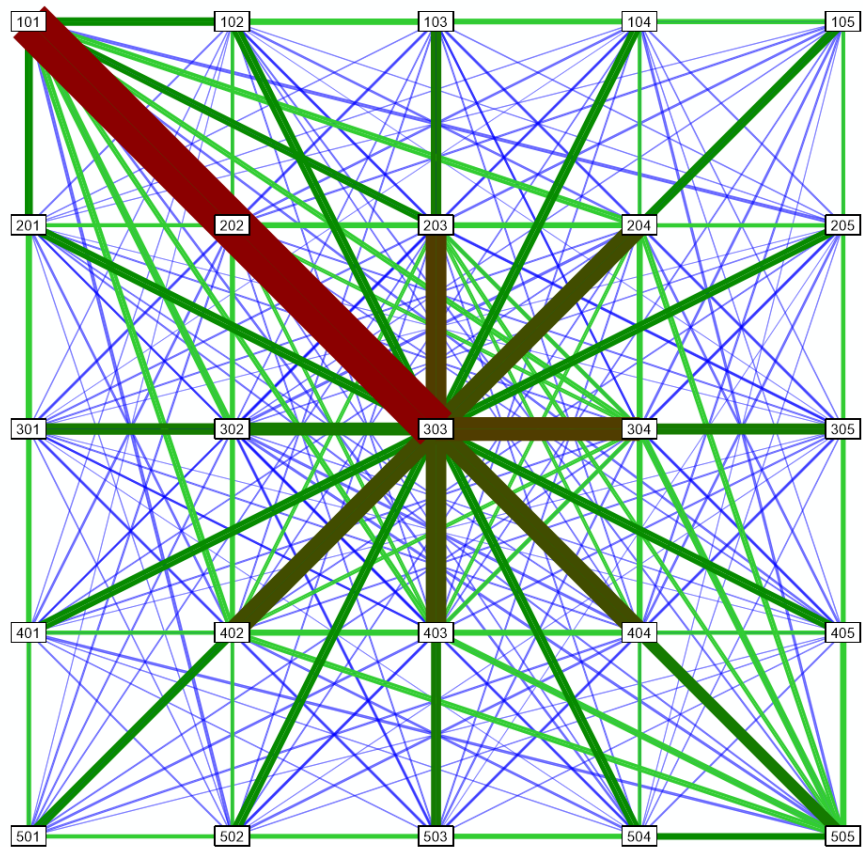


Abbildung C.1: Visualisierung der Nachfrageströme zwischen den Verkehrszellen, wie sie sich bei der Zielwahl aus den Strukturdaten und dem Verkehrsangebot ergeben.

D Aufteilung des Grundmodells auf Einzeldateien

Tabelle D.1: Aufteilung des Grundmodells auf Einzeldateien.

Datei	Typ	VISUM-Tabellen (deutsch)	VISUM-Tabellen (englisch)
00_Basis.net	.net	Verkehrstage Netz Verkehrssysteme Modi Richtungen Betreiber	Validdays Network Transport systems Modes Directions Operators
01_DSegs_and_Time_Intervals.net	.net	Zeitintervallmengen Zeitintervalle Nachfragesegmente	Time interval sets Time intervals Demand segments
02_UDAs.net	.net	Benutzerdefinierte Attribute	User-defined attributes
03_Time_Series_Matrices.dmd	.dmd	Matrizen (Nur Matrizen 50 – 86)	Matrices
04_Demand_Models_and_Time_Series.dmd	.dmd	Nachfragemodelle Personengruppen Strukturgrößen Aktivitäten Aktivitätenpaare Aktivitätenketten Nachfrageschichten Ganglinien Ganglinieneinträge Nachfrageganglinien Nachfragebeschreibungen VISEM-Ganglinien	Demand models Person groups Structural properties Activities Activity pairs Activity chains Demand strata Time series Time series items Demand time series Demand descriptions VISEM Time series
05_Link_Types.net	.net	Streckentypen	Link types
06_Infrastructure.net	.net	Knoten Strecken Abbieger	Nodes Links Turns
07_PuT_Infrastructure.net	.net	Haltestellen Haltestellenbereiche Haltepunkte Haltestellenbereichs-Übergangsgehzeiten	Stops Stop areas Stop points Transfer walk times between stop areas
08_Zones.net	.net	Bezirke Anbindungen	Zones Connectors
09_Matrices.dmd	.dmd	Matrizen	Matrices
10_network_attributes.json	JSON	Netzweite benutzerdefinierte Attribute: SPLIT_EMPLOYEE_WITH_CAR SUM_OTHER SUM_RESIDENTS SUM_WORK_PLACES	
11_PuT_Vehicles.net	.net	Fahrzeugeinheiten Fahrzeugkombinationen Fahrzeugkombinations-Elemente	Vehicle units Vehicle combinations Vehicle combination items

Datei	Typ	VISUM-Tabellen (deutsch)	VISUM-Tabellen (englisch)
12<...>_PuT_Supply_<...>.net	.net	Linien Linienrouten Linienrouten-Verläufe Fahrzeitprofile Fahrzeitprofil-Verläufe Fahrplanfahrten Fahrplanfahrtverläufe Fahrplanfahrtabschnitte	Lines Line routes Line route items Time profiles Time profile items Vehicle journeys Vehicle journey items Vehicle journey sections
13_coefficients_costs.json	JSON	Netzweite benutzerdefinierte Attribute: coeff_time coeff_cost coeff_owt prt_cost_base prt_cost_km put_fare_base put_fare_km	
14_MSC.att	.att	Personengruppen	Person groups
	.xml	(Verfahrensablauf)	(Procedure Sequence)

E Reale Modal-Split-Daten

Tabelle E.1: Basisdaten und Modal-Split-Daten zu 35 deutschen Städten, wie sie aus [6] übernommen und für Analysen verwendet wurden.

Stadt	Einwohner	Ew-Dichte Ew / km ²	Studierende	Modal Split (aufkommensbezogen) in %				
				MIV-Selbstfahrer	MIV-Mitfahrer	ÖV	Fuß	Rad
Aachen	247 000	1 600	58 200	33	13	13	30	11
Ansbach	41 900	420	3 100	47	14	5	23	10
Aschaffenburg	70 500	1 100	3 300	41	17	8	23	11
Berlin	3 600 000	4 100	192 000	22	9	26	27	15
Bonn	327 000	1 600	38 000	28	12	17	27	16
Bremen	569 000	1 600	37 400	25	9	16	27	24
Brühl	46 000	1 300	0	35	17	8	27	14
Darmstadt	159 000	1 300	44 500	27	12	15	29	17
Erlangen	112 000	1 500	29 200	25	12	10	25	28
Frankfurt (Main)	753 000	3 000	66 800	20	7	24	33	16
Freiburg	230 000	1 500	32 700	23	9	17	27	23
Fulda	68 600	660	9 000	42	17	8	26	6
Fürstenfeldbruck	38 200	1 200	0	37	14	11	22	16
Fürth	128 000	2 000	0	34	13	14	27	11
Hamburg	1 800 000	2 500	110 000	25	10	23	27	15
Hannover	538 000	2 600	49 800	26	8	20	27	19
Heidelberg	160 000	1 500	39 000	26	8	14	26	27
Karlsruhe	313 000	1 800	41 800	29	8	15	24	24
Kassel	202 000	1 900	25 000	33	10	19	27	10
Koblenz	114 000	1 100	17 300	40	13	10	28	9
Köln	1 100 000	2 700	99 800	25	10	19	28	18
Lübeck	217 000	1 000	10 700	32	11	11	25	21
Ludwigsburg	93 500	2 200	10 000	42	11	14	25	8
Mannheim	309 000	2 200	29 000	34	10	15	24	17
München	1 500 000	5 000	127 000	23	9	25	25	18
Neuwied	64 600	760	0	47	20	7	21	5
Nürnberg	518 000	2 900	24 700	32	11	20	24	14
Offenbach	129 000	3 100	750	35	10	16	27	12
Pforzheim	126 000	1 300	6 000	46	17	10	25	3
Schwerin	95 700	760	740	36	14	10	28	11
Stuttgart	635 000	3 000	48 000	30	9	23	30	7
Ulm	126 000	1 100	14 200	32	13	13	30	12
Wiesbaden	278 000	1 400	10 400	34	19	17	26	5
Wuppertal	354 000	2 100	22 000	38	17	18	24	2
Würzburg	128 000	1 500	37 500	30	14	15	27	13

Tabelle E.2: Korrelationskoeffizienten der Modal-Split-Werte mit den potentiellen Erklärgrößen Einwohnerzahl, Einwohnerdichte und Studierendenanteil sowie Korrelationen zwischen den potentiellen Erklärgrößen.

	Einwohner	Ew-Dichte	Studierendenanteil
Ew-Dichte	0,7055		
Studierendenanteil	-0,1306	-0,1204	
ÖV-Anteil	0,7014	0,8621	0,0045
MIV-Anteil	-0,5116	-0,6069	-0,3165
MIV-Selbstfahreranteil	-0,5229	-0,5675	-0,3245
MIV-Mitfahreranteil	-0,3953	-0,5817	-0,2421
Slow-Modes-Anteil	0,1838	0,2079	0,4388
Radfahreranteil	0,1379	0,1450	0,3698
Fußgängeranteil	0,1661	0,2173	0,2887

Tabelle E.3: Parameter aller gezeigten Regressionsfunktionen der Formen $y = m \cdot x + c$ bzw. $y = a \cdot \ln(b \cdot x)$.

Abbildung	unabhängige Variable („x“)	abhängige Variable („y“)	m	c	a	b
2.2	n_{Ew}	ρ_{Ew}	$1,0158 \cdot 10^{-3} \text{ km}^{-2}$	$1,4248 \cdot 10^3 \text{ Ew/km}^2$	$7,0620 \cdot 10^2 \text{ Ew/km}^2$	$6,3131 \cdot 10^{-5} \text{ Ew}^{-1}$
2.3a	n_{Ew}	$\phi_{ÖV}$	$5,5458 \cdot 10^{-8} \text{ Ew}^{-1}$	$1,2622 \cdot 10^{-1}$	$4,4482 \cdot 10^{-2}$	$1,3188 \cdot 10^{-4} \text{ Ew}^{-1}$
2.3b	ρ_{Ew}	$\phi_{ÖV}$	$4,7348 \cdot 10^{-5} \text{ km}^2/\text{Ew}$	$6,1949 \cdot 10^{-2}$		
2.4a	n_{Ew}	$\phi_{MIV, ges}$	$-7,6003 \cdot 10^{-8} \text{ Ew}^{-1}$	$4,7899 \cdot 10^{-1}$	$-6,6912 \cdot 10^{-2}$	$5,7295 \cdot 10^{-9} \text{ Ew}^{-1}$
2.4b	ρ_{Ew}	$\phi_{MIV, ges}$	$-6,2618 \cdot 10^{-5} \text{ km}^2/\text{Ew}$	$5,6283 \cdot 10^{-1}$		
2.5a	n_{Ew}	ϕ_{slow}	$1,9250 \cdot 10^{-8} \text{ Ew}^{-1}$	$3,9422 \cdot 10^{-1}$	$2,2453 \cdot 10^{-2}$	$2,7516 \cdot 10^2 \text{ Ew}^{-1}$
2.5b	ρ_{Ew}	ϕ_{slow}	$1,5125 \cdot 10^{-5} \text{ km}^2/\text{Ew}$	$3,7435 \cdot 10^{-1}$		
2.6a	ω_{stud}	$\phi_{ÖV}$	$3,0134 \cdot 10^{-3}$	$1,4999 \cdot 10^{-1}$		
2.6b	ω_{stud}	$\phi_{MIV, ges}$	$-3,9666 \cdot 10^{-1}$	$4,8471 \cdot 10^{-1}$		
2.6c	ω_{stud}	ϕ_{Fuss}	$8,7803 \cdot 10^{-2}$	$2,5457 \cdot 10^{-1}$		
2.6d	ω_{stud}	ϕ_{Rad}	$2,9998 \cdot 10^{-1}$	$1,1015 \cdot 10^{-1}$		
2.6e	ω_{stud}	ϕ_{slow}	$3,8778 \cdot 10^{-1}$	$3,6472 \cdot 10^{-1}$		
6.11, F.1	ρ_{Ew}	${}^{II}\phi_{ÖV}$	$8,4773 \cdot 10^{-5} \text{ km}^2/\text{Ew}$	$1,0029 \cdot 10^{-1}$		

F Vergleich von Modellkonfigurationen

Wie in Abschnitt 4.12 erläutert, wurden einige der im Hauptteil vorgestellten Untersuchungen zuvor bereits mit einer anderen Modellkonfiguration gerechnet. In diesem Abschnitt werden einige Auswertungen der beiden Modellzustände verglichen, um die Unterschiede bzw. die Auswirkungen der Änderungen aufzuzeigen.

Änderungen

Beim Vergleich der Modellergebnisse mit der Realität, wie sie in Abschnitt 6.5 beschrieben ist, zeigte sich, dass im Vergleich zu den Realitätsdaten der ÖV-Anteil bei der alten Modellkonfiguration bei zunehmender Dichte zu stark und zu schnell ansteigt. Um dem entgegenzuwirken könnte beispielsweise die IV-Kapazität erhöht oder eine flachere CR-Funktion gewählt werden.

Bereits zuvor war als problematisch aufgefallen, dass die Straßendichte (also Straßenkilometer pro Quadratkilometer) des hinterlegten VISUM-Streckennetzes mit $0,8 \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$ zu gering war, um ein städtisches Straßennetz sinnvoll zu repräsentieren. Dies war jedoch zunächst unberücksichtigt geblieben, da die Struktur des Modells gegenüber den Vorarbeiten nicht zu sehr verändert werden sollte.

Mit der neuen Erkenntnis wurde es als sinnvoll erachtet, die Kapazität der Strecken zu erhöhen, mit dem Gedanken dass eine Strecke im VISUM-Modell mehrere Straßen repräsentieren soll.

Der zweite Aspekt zeigte sich bei den ersten Untersuchungen zum Modelldurchlauf mit Tarifierpassung im Vergleich zum Modelldurchlauf ohne Tarifierpassung. Die ÖV-Ticketpreise, die zu Beginn der Arbeit einmal „blind“ gesetzt worden waren und danach nicht mehr geändert wurden, waren zu niedrig angesetzt, nicht nur um (annähernde) Kostendeckung erreichen zu können, sondern auch um mit den realen Fahrpreisen in deutschen Städten vergleichbar zu sein. Darum wurden die Fahrpreise im Modell erhöht.

Wichtig dabei ist, dass bei beiden Änderungen die Diskrepanz zur Realität nicht nur am Modell-Output, sondern auch an den Eingangsdaten erkennbar ist. Dadurch lässt sich die Änderung rechtfertigen, ohne das Modell komplett in Frage zu stellen. Außer-

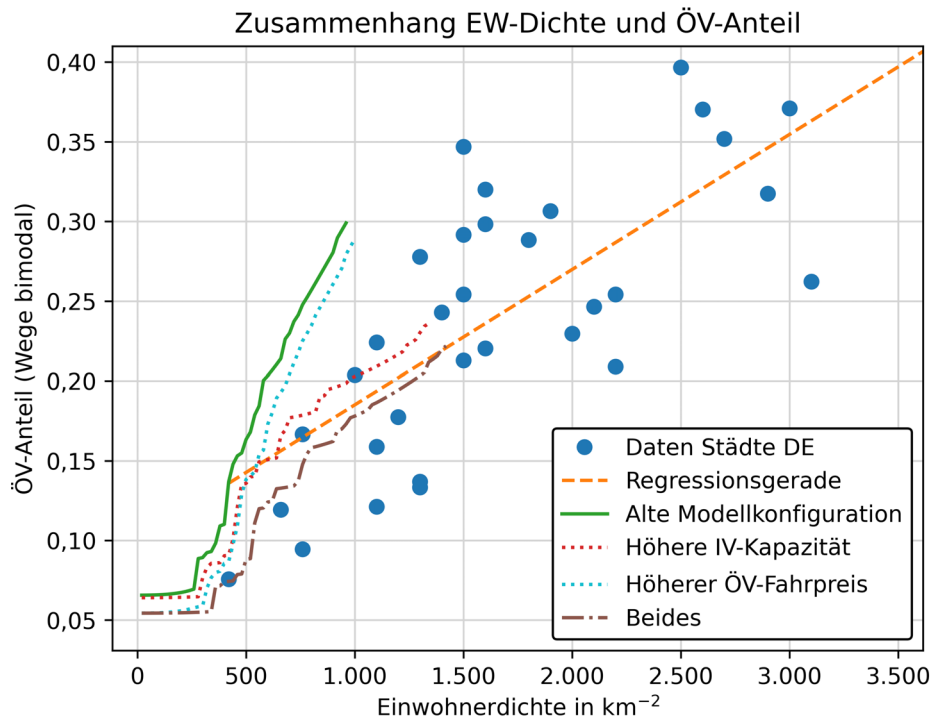


Abbildung F.1: Verlauf des ÖV-Anteil in der Modelluntersuchung mit Taktanpassung nach der alten Modellkonfiguration und Untersuchungen zu den vorgeschlagenen Modifikationen. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt, es sind nicht alle Städte des Datensatzes abgebildet.

dem sei angemerkt, dass beide Änderungen die Moduswahl zugunsten des MIV beeinflussen.

Abbildung F.1 zeigt den Vergleich der Ergebnisse der Untersuchung mit Taktanpassung mit den realen Daten der deutschen Städte sowie die Auswirkungen der vorgeschlagenen (und schließlich übernommenen, siehe Tabelle F.1) Modifikationen auf diesen Verlauf. Durch den höheren ÖV-Fahrpreis sinkt der ÖV-Anteil ab Beginn des Experiments gegenüber der ursprünglichen Konfiguration, folgt in seinem Anstieg jedoch mit ungefähr gleichbleibendem Versatz dem Verlauf der ursprünglichen Konfiguration. Durch die höhere Kapazität im IV-Netz weicht der Modal Split bei sehr niedrigen Einwohnerdichten nur geringfügig vom Verlauf der ursprünglichen Konfiguration ab, steigt dann gegenüber dieser zunächst etwas später aber in ähnlichem Winkel, dann im weiteren Verlauf jedoch deutlich weniger steil an. Die Konfiguration mit beiden Modifikationen vereint erwartungsgemäß beide Effekte.

Darüber hinaus wurden im gleichen Zuge auch die angenommenen IV-Kosten moderat angepasst. Eine Übersicht der Änderungen mit den konkreten Zahlenwerten ist in Tabelle F.1 dargestellt. Alle im Hauptteil dieser Arbeit gezeigten Auswertungen beziehen

Tabelle F.1: Änderungen zwischen den verglichenen Modellkonfigurationen.

Sachverhalt	Modellbezeichnung	alter Wert		neuer Wert	Einheit
Kapazität Streckentyp 40	CapPrT	10 000	→	20 000	Fzg/d
Kapazität Streckentyp 50	CapPrT	8 000	→	16 000	Fzg/d
Kapazität Streckentyp 80	CapPrT	4 000	→	8 000	Fzg/d
Basisanteil ÖV-Fahrpreis	PuTFareBase	0,50	→	1,00	€
Entf.-anteil ÖV-Fahrpreis	PuTFareKm	0,10	→	0,15	€/km
Basisanteil IV-Kosten	PrTCostBase	0,00	→	0,00	€
Entf.-anteil IV-Kosten	PrTCostKm	0,12	→	0,14	€/km

sich auf die neue Konfiguration. Im Folgenden werden einige der in den Kapiteln 5 und 6 gezeigten Auswertungen zwischen der alten und der neuen Konfigurationen verglichen.

Vergleich in Untersuchungen ohne Kapazitätsanpassung

Alle Untersuchungen in diesem Abschnitt, die nicht explizit die beiden ÖV-Angebote vergleichen, beziehen sich auf das Angebot mit konstantem 20'-Takt. In allen Abbildungen in diesem Abschnitt haben die nebeneinanderstehenden Plots die gleichen Skalierungen an x - und y -Achse.

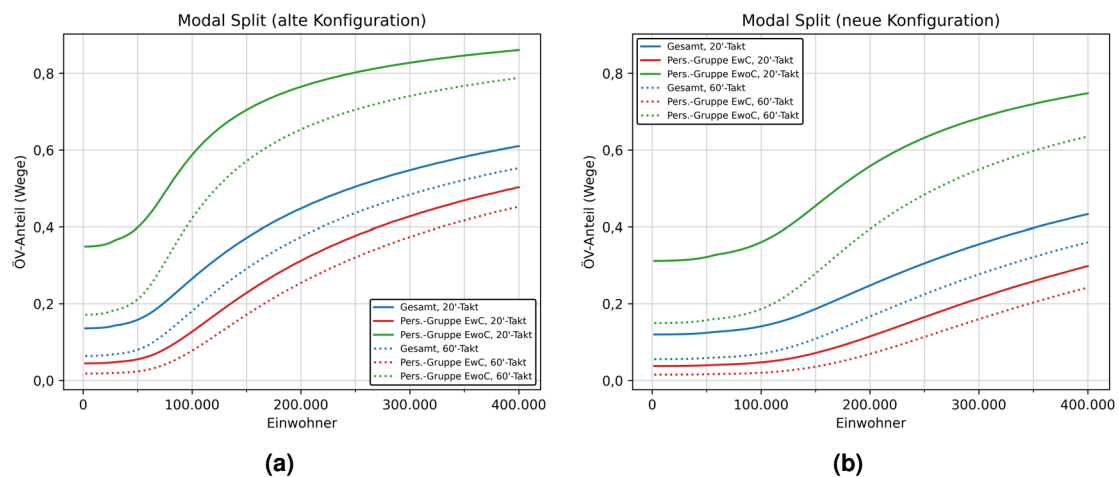


Abbildung F.2: Vergleich der Untersuchungen des aufkommensbezogenen Modal Split für die unterschiedlichen Personengruppen und die beiden konstanten ÖV-Angebote für die alte (a) und neue (b) Modellkonfiguration.

Abbildung F.2 vergleicht die Verläufe des Modal Split für die unterschiedlichen Personengruppen und ÖV-Angebote in der Untersuchung ohne Angebotsanpassung. Während die grundsätzlichen Aussagen zu den Zusammenhängen gleich bleiben, lässt sich

festhalten, dass der ÖV-Anteil in der alten Modellkonfiguration zu Beginn bereits etwas höher ist und dann schneller und steiler ansteigt als in der neuen Konfiguration. Auch sind die Kurven charakteristischer gekrümmt. Durch die geringere IV-Kapazität treten deren Auswirkungen auf den Modal Split früher und deutlicher in Erscheinung.

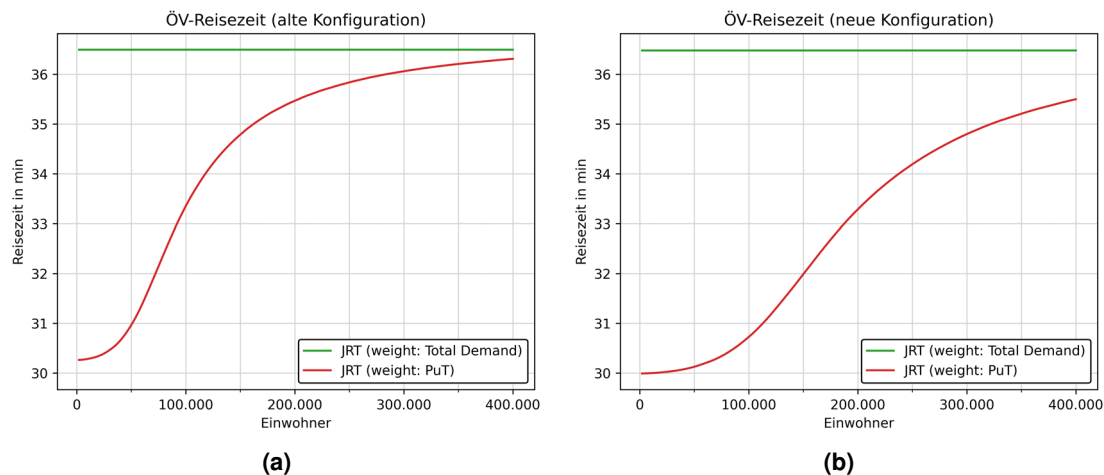


Abbildung F.3: Vergleich der nach potentieller (Total Demand) und realisierter (PuT) Nachfrage gewichteten mittleren Reisezeit (JRT) im ÖV bei konstantem ÖV-Angebot mit 20'-Takt in der alten (a) und neuen (b) Modellkonfiguration.

Abbildung F.3 vergleicht die ÖV-Reisezeit in den beiden unterschiedlichen Gewichtungungen zwischen den beiden unterschiedlichen Modellkonfigurationen. In der neuen Konfiguration ist die nach realisierter Nachfrage gewichtete Reisezeit zu Beginn des Experiments etwas geringer. Wegen der höheren ÖV-Fahrpreise fokussiert sich hier die Wahl des ÖV noch stärker auf die Relationen mit „guten“ (schnellen) ÖV-Verbindungen sowie auf kurze Relationen. Der Anstieg der Kurve erfolgt hier wieder bei der alten Konfiguration schneller, steiler und charakteristischer gekrümmt. Wie bereits erläutert zeigt sich die Wirkung der IV-Kapazität hier früher und deutlicher. In der alten Konfiguration nähert sich die nach realisierter Nachfrage gemittelte Reisezeit deutlich näher an die nach potentieller Nachfrage gewichtete Reisezeit an. Die Struktur der ÖV-Nachfragematrix nähert sich hier also stärker an die Struktur der Gesamtnachfragematrix an, was sich durch die stark erhöhte IV-Reisezeit und den damit sehr hohen ÖV-Anteil (siehe Abbildung F.2) von bis über 60 % erklären lässt.

In Abbildung F.4 werden die mittleren Reisezeiten nach Modus zwischen den beiden Modellkonfigurationen verglichen. Bei sehr geringen Dichten ist die Situation in beiden Konfigurationen quasi identisch. Der Anstieg der Reisezeiten erfolgt in der neuen Konfiguration deutlich flacher. Gut zu erkennen ist, wie sich der Schnittpunkt der drei Kurven

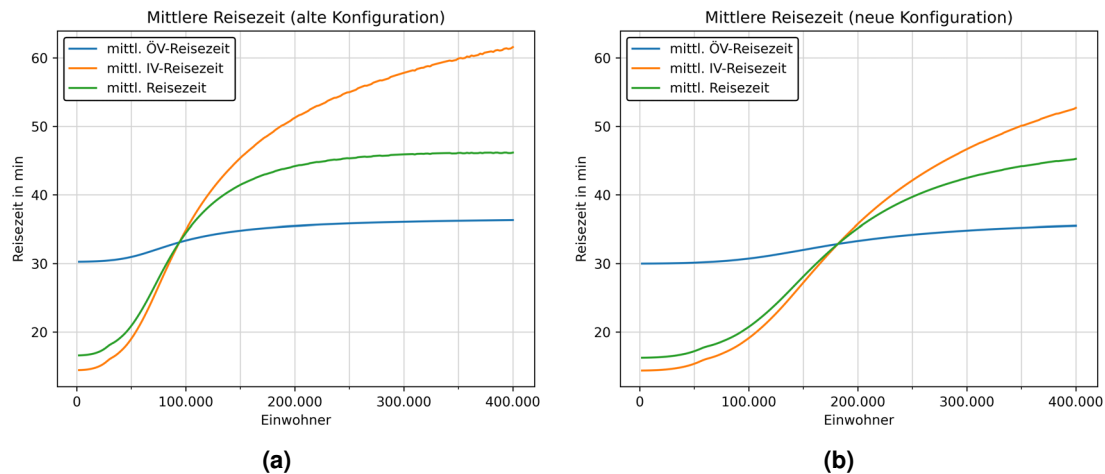


Abbildung F.4: Vergleich der Untersuchung zur mittleren Reisezeit (gemittelt nach realisierter Nachfrage) der beiden Modi IV und ÖV bei konstantem ÖV-Angebot im 20'-Takt für die beiden Modellkonfigurationen alt (a) und neu (b).

sich nach rechts verschoben hat. In Abbildung F.4a ist auffällig, dass zum Ende des Experiments die grüne Kurve der mittleren Reisezeit über die Gesamtbevölkerung gesehen fast eben verläuft, während die orangene Kurve der mittleren IV-Reisezeit noch deutlich ansteigt. Dieser Anstieg wird offenbar durch weitere Modal-Split-Verlagerungen ausgeglichen.

Auch in Abbildung F.5, in der die mittleren Reiseweiten in den beiden Modi zwischen den Modellkonfigurationen verglichen werden, ist die Verschiebung des Schnittpunktes der Kurven nach rechts deutlich erkennbar. Auch hier erfolgt der Anstieg der ÖV-Reiseweite bzw. der Abfall der IV-Reiseweite sehr viel langsamer.

Da die Änderung der Konfiguration auch in der Zielwahl berücksichtigt wird, ist die mittlere Reiseweite über die Gesamtnachfrage in der neuen Konfiguration leicht niedriger als in der alten. Dies liegt an den höheren Preisen, da sich damit der Widerstand in der Zielwahl erhöht. Da in der Zielwahl keine Rückkopplung erfolgt, hat die Erhöhung der Kapazität hier keinen Einfluss¹.

In Abbildung F.5a ist erkennbar, dass die blaue Kurve der ÖV-Reiseweite nach zunächst starkem Anstieg am Ende wieder leicht abfällt. Dies liegt daran, dass bei immer weiter steigendem Modal Split sich die Struktur der ÖV-Nachfragematrix an die der Gesamtnachfrage annähern muss, und folglich die blaue Kurve sich der Grünen annähern muss.

¹ Gar keinen Einfluss nur deshalb, da die Vorauslastung prozentual definiert ist und sich die absolute Vorbelastung entsprechend genau so erhöht, dass die CR-Funktion weiterhin den selben Wert annimmt. Auch sonst wäre der Einfluss gering.

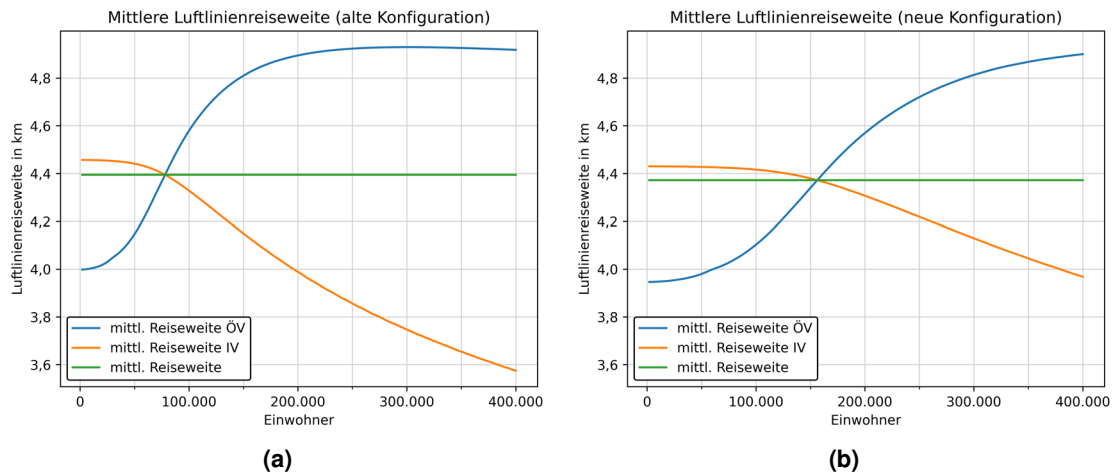


Abbildung F.5: Vergleich der Untersuchung zur mittleren Reiseweite der beiden Modi IV und ÖV bei konstantem ÖV-Angebot im 20'-Takt für die beiden Modellkonfigurationen alt (a) und neu (b).

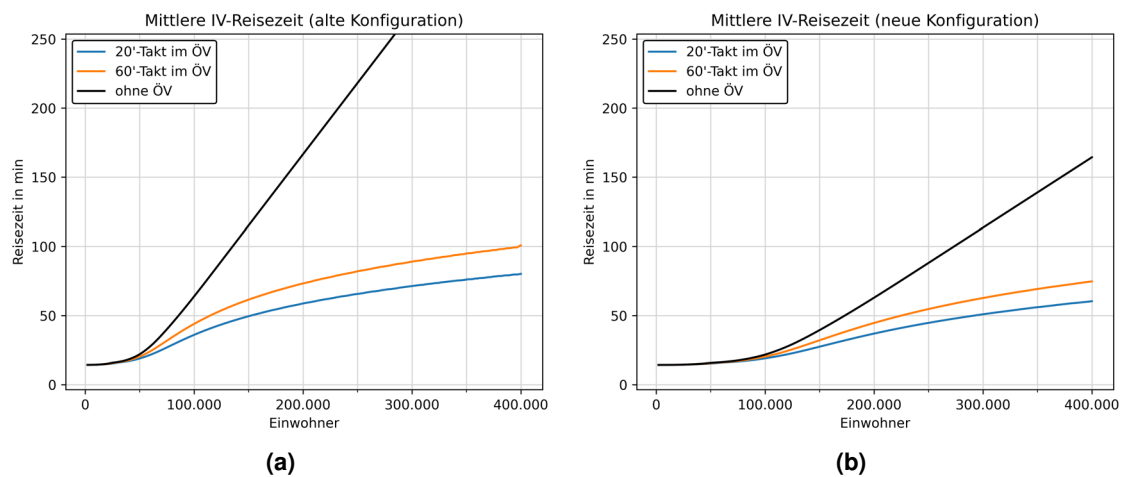


Abbildung F.6: Vergleich der Untersuchungen der (nach potentieller Nachfrage gewichteten) mittleren IV-Reisezeit für die beiden konstanten ÖV-Angebote und den Vergleichsfall gänzlich ohne ÖV für die beiden Modellkonfigurationen alt (a) und neu (b).

Vergleich in Untersuchungen mit Kapazitätsanpassung

Abbildung F.7 vergleicht den Verlauf des Modal Split in der Untersuchung mit Angebotsanpassung und den jeweiligen Modal-Split-Verläufen bei konstantem ÖV-Angebot im Hintergrund. In der gewählten Darstellung, in der x - und y -Achse für beide Plots identisch sind, ist klar ersichtlich, dass in der alten Konfiguration das Experiment bereits bei deutlich geringerer Einwohnerzahl endet, dafür einen höheren ÖV-Anteil erreicht. Auch beginnt hier die Angebotsanpassung etwas früher. Dies ist auch in Abbildung F.8 ersichtlich, in der die Entwicklung des Angebots auf den einzelnen Linien verglichen wird. Grundsätzlich sind die Entwicklungen des Angebots sehr ähnlich, in der alten Konfiguration passiert jedoch alles etwas früher, da aufgrund von höherem Modal Split die Auslastungen schneller ansteigen. So ist das Experiment auch früher beendet.

Der höhere Modal Split erklärt sich durch die mit der Einwohnerzahl deutlich schneller ansteigenden IV-Reisezeiten aufgrund der geringeren Straßenkapazität sowie des geringeren Fahrpreises.

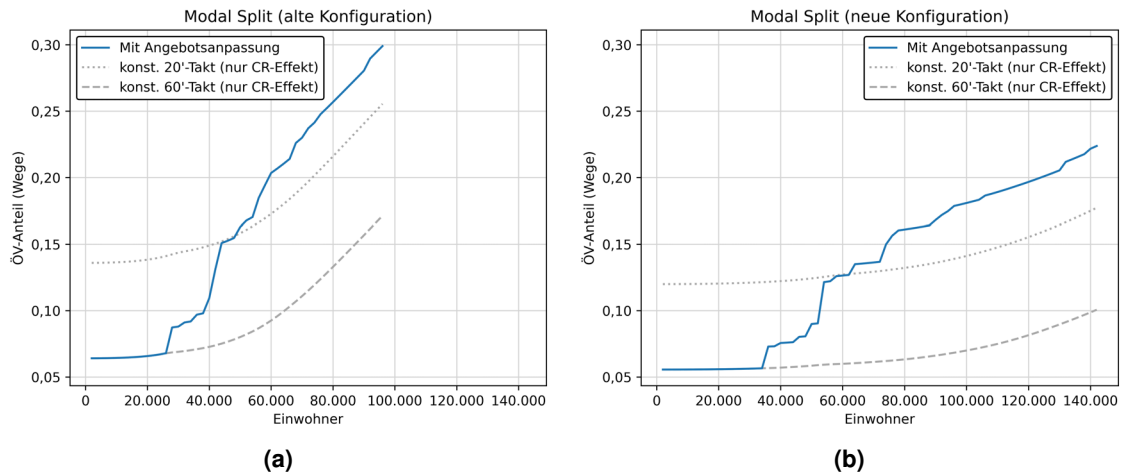


Abbildung F.7: Vergleich des Modal Splits in den Untersuchungen mit und ohne Angebotsanpassung in der alten (a) und neuen (b) Modellkonfiguration.

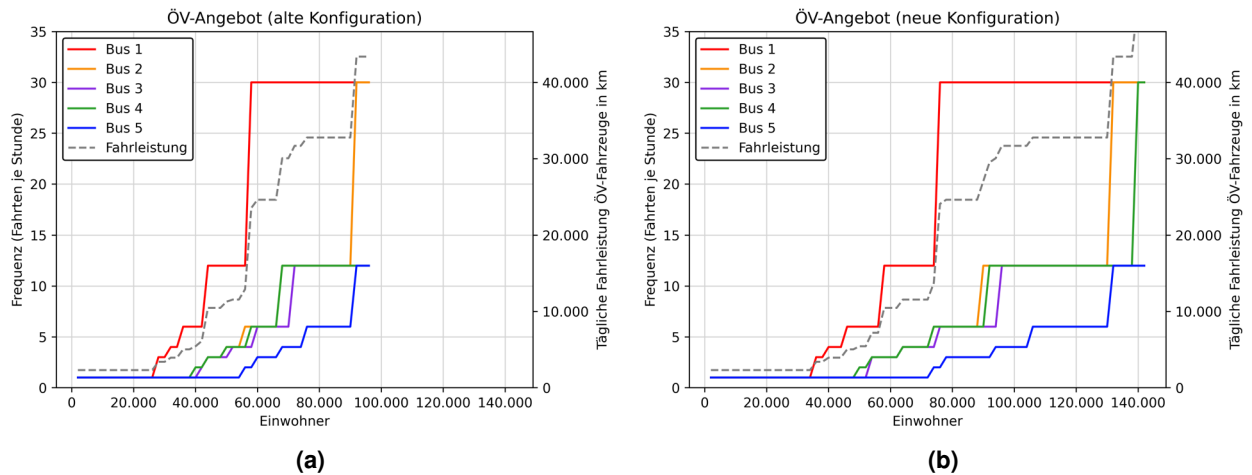


Abbildung F.8: Vergleich der Entwicklung des ÖV-Angebots in der Untersuchung mit Taktanpassung in der alten (a) und neuen (b) Modellkonfiguration.