

Integration von Zuverlässigkeit der Reisezeit in ein makroskopisches Verkehrsnachfragemodell

Institut für Verkehrswesen
Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
Karlsruher Institut für Technologie

Masterarbeit

von

Maximilian Hennecke

Matrikelnummer 2491325

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Martin Kagerbauer

Betreuende wissenschaftliche Mitarbeiter:in:

Christian Klinkhardt, M.Sc.

Tag der Abgabe: 26.11.2025

Karlsruhe

Erklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat und von dieser als Teil einer Prüfungsleistung angenommen wurde. Alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet. Zu fremder Hilfe zählen insbesondere entgeltliche Leistungen Dritter z. B. Internet-Agenturen, welche die schriftliche Fassung auf Rechtschreibung und / oder Zeichensetzung, Grammatik, Formulierung, Logik, Plausibilität, Satzbau, Sinn, Stil prüfen. Die Satzung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der aktuell gültigen Fassung wurde von mir bei der Bearbeitung berücksichtigt. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt. Ich räume dem Institut für Verkehrswesen das Nutzungsrecht an der vorliegenden Arbeit ein. Das Nutzungsrecht umfasst insbesondere die Weiterverwendung der erlangten Erkenntnisse und Ergebnisse in anderen Arbeiten oder Veröffentlichungen durch Mitarbeiter:innen des Instituts für Verkehrswesen. Der Nutzung durch die Präsenzbibliothek des Instituts stimme ich ebenfalls zu.

Karlsruhe, den 26.11.2025

Maximilian Hennecke

Aufgabenstellung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, bestehende Erkenntnisse zum Einfluss von Reisezeitzuverlässigkeit auf die Verkehrsmittelwahl in ein bestehendes makroskopisches Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart (VISUM) zu integrieren. Damit soll ein methodischer Beitrag geleistet werden, um Verhaltenseffekte infolge von Unzuverlässigkeit künftig im Rahmen von Planungs- und Bewertungsprozessen systematisch berücksichtigen zu können. Hierfür sollen die folgenden Arbeitsschritte durchgeführt werden:

- Durchführung einer Literaturrecherche zur Abbildung von Zuverlässigkeit in Verkehrsnachfragemodellen und Bewertungsverfahren
- Identifikation und Zusammenstellung verfügbarer Datenquellen zu Reisezeitunzuverlässigkeit (z. B. Verspätungen im SPNV) und zu verhaltensbezogenen Präferenzen (z. B. Stated-Choice-Erhebungen)
- Aufbereitung und Integration dieser Daten in das bestehende VISUM-Modell der Region Stuttgart
- Entwicklung eines geeigneten methodischen Ansatzes zur Berücksichtigung der Daten in der Verkehrsmittelwahl des Modells
- Berechnung und Auswertung von Szenarien, um die Anwendbarkeit der Methode darzustellen sowie Sensitivitäten aufzuzeigen
- Validierung der Methodik anhand ausgewählter Strecken mit nachgewiesenen Änderungen in der Zuverlässigkeit
- Kritische Diskussion der Ergebnisse und Ableitung von Empfehlungen für künftige Modellierungsansätze

Kurzfassung

Funktionierende Verkehrssysteme sind für die Alltagsmobilität unverzichtbar, verursachen jedoch erhebliche Umwelt- und Gesundheitsbelastungen. Eine wirksame Reduktion dieser Risiken erfordert die Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr zum öffentlichen Verkehr. Voraussetzung dafür ist ein zuverlässiges ÖV-Angebot – ein Aspekt, der in Verkehrsnachfragemodellen bislang selten explizit berücksichtigt wird. Diese Masterarbeit quantifiziert den Einfluss der Reisezeitzuverlässigkeit auf die Verkehrsmittelwahl mithilfe des makroskopischen Verkehrsnachfragemodells des Verbands Region Stuttgart. Hierzu werden Verspätungskennwerte des schienengebundenen Regionalverkehrs berechnet und in der Verkehrsmittelwahl des Modells durch eine Anpassung der Nutzenfunktion berücksichtigt. Drei Szenarien mit unterschiedlicher Sensitivität der Bewertung der Reisezeitvariabilität bilden die Wirkungen räumlich ab und ermöglichen die Ableitung von Fahrgastgewinnen.

Die Ergebnisse verbesserter Zuverlässigkeit zeigen deutliche Nachfragezuwächse insbesondere auf nachfragestarken und stark verspäteten Relationen (u.a. Stuttgart–Esslingen, Göppingen Mittelzentrum–Göppingen Verflechtungsbereich und entlang des Korridors Bietigheim-Bissingen–Esslingen), während Relationen mit geringen Verspätungen geringere Effekte aufweisen. Zudem verlängern sich die ÖV-Wege-längen. Methodisch begrenzend wirkt, dass Verspätungen nur für einen Teil der Wege vorlagen und als statische Werte ohne Berücksichtigung von Umstiegszeiten in die Umlegung eingingen. Die Integration von pauschalen Verspätungswerten für Wege ohne Verspätungswerte vergrößern die Nachfragezuwächse, sind jedoch vorsichtig zu interpretieren. Insgesamt zeigt die Arbeit, dass die Integration der Reisezeitzuverlässigkeit – trotz erheblicher Daten- und Prozessaufwände – verhaltensrelevante Effekte belastbar abbildet und damit sowohl die Modellentwicklung als auch Nutzen-Kosten-Untersuchungen substantiell ergänzt. Perspektivisch sind eine Vereinfachung des Verfahrens, die Harmonisierung und Standardisierung der Verspätungsdaten sowie eine weitergehende Untersuchung verhaltensbezogener Strategien im Umgang mit Unzuverlässigkeit im öffentlichen Verkehr erforderlich.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	v
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungen	xiii
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen der Verkehrsmodellierung	3
2.1 Ablauf der Verkehrsnachfragemodellierung	3
2.2 Stated-Preference- und Revealed-Preference-Befragungen	6
2.3 Einsatzmöglichkeiten von Verkehrsmodellen	8
3 Integration von Reisezeitzuverlässigkeit in die Verkehrsmittelwahl	11
3.1 Reisezeitzuverlässigkeit als Variable der Verkehrsmittelnutzenfunktion .	11
3.2 Ansätze zur Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit	12
3.3 Stated-Choice-Experimente zur Reisezeitzuverlässigkeit	14
3.4 Angewandter Ansatz zur Integration der Reisezeitzuverlässigkeit	15
4 Datengrundlage	19
4.1 Makroskopisches Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart	19
4.2 Parameterschätzungen zur Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit . . .	23
4.3 Verspätungsdaten	24
4.4 Angebotsdaten	24
5 Methodik	27
5.1 Beschreibung des Forschungsdesigns	27
5.2 Transformation und Berechnung der Verspätungsdaten	29
5.3 Verknüpfung der Angebotsdaten mit den Verspätungsdaten	29
5.4 Import der Angebotsdaten in das Nachfragemodell	31
5.5 Verkehrsmittelwahlmodellierung	32

6	Ergebnisse	35
6.1	Anpassung der Berechnung der Verspätungskenndaten	35
6.2	Ergebnisse der Linienverspätungen	38
6.3	Iterative Verknüpfung der Verspätungskenndaten	45
6.4	Harmonisierung der Angebots- und Nachfragedaten	46
6.5	Anpassungen der Verkehrsmittelwahlmodellierung	47
6.6	Ergebnisse der Verkehrsmittelwahlmodellierung	54
7	Fazit	63
8	Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf	67
A	Anhang	69
A.1	Ausgewertete Regionalzüge	69
A.2	GTFS-Datensatz der NVBW	72
	Literaturverzeichnis	77
	Glossar	81

Abbildungsverzeichnis

4.1	Die 100 Oberbezirksbeziehungen mit größter ÖV-Nachfrage	23
4.2	Streckennahe Verortung von GTFS-Linienrouten in Karlsruhe	26
5.1	Ablauf der Verknüpfung und Bearbeitung der Datensätze	28
5.2	Darstellung der Arbeitspakete für Integration zur Reisezeitzuverlässigkeit in das Verkehrsmodell	28
5.3	Verknüpfung der Verspätungsdaten mit den GTFS-Daten	29
5.4	Integration der GTFS-Fahrplandaten mit Verspätungswerten in das Nach- fragemodell	31
5.5	Importierte ÖV-Linien im VRS-Netzmodell	32
5.6	Ablauf der Verkehrsmittelwahlmodellierung unter Berücksichtigung der Reisezeitzuverlässigkeit	33
6.1	Ausschnitt aus einem Kursbuch der Deutschen Bahn	35
6.2	Verfahrensablauf der Berechnung von Verspätungskennwerten über die Haltestellenfolge	38
6.3	Verspätungskennwerte der ausgewerteten Linien	39
6.4	Verspätungskennwerte des MEX16	39
6.5	Verspätungskennwerte des MEX17c	41
6.6	Pünktlichkeitsquote der ausgewerteten Linien	41
6.7	Verspätungskennwerte im Tagesverlauf	42
6.8	Dichtefunktion der Verspätungen des MEX18	44
6.9	Steigerung der verknüpften Verspätungsdaten mit den GTFS-Daten . . .	46
6.10	Betrachtung aller ÖV-Linien: Mittlere Verspätung der Bezirksbeziehungen Richtung Schorndorf	48

6.11 Betrachtung Regionalzüge mit Verspätungsdaten: Mittlere Verspätung der Bezirksbeziehungen Richtung Schorndorf	49
6.12 Mittlere Verspätung aggregiert für Oberbezirke	50
6.13 Planfall 1: Veränderung der Verkehrsmittelwahl aufgrund verbesserter Zuverlässigkeit	55
6.14 Planfall 1: Oberbezirke mit Fahrgastgewinnen	56
6.15 Planfall 2: Veränderung der Verkehrsmittelwahl aufgrund verbesserter Zuverlässigkeit	58
6.16 Planfall 2: Oberbezirke mit Fahrgastgewinnen	58
6.17 Planfall 3: Veränderung der Verkehrsmittelwahl aufgrund verbesserter Zuverlässigkeit	60
6.18 Planfall 3: Oberbezirke mit Fahrgastgewinnen	60
6.19 Veränderung der Verkehrsmittelwahl aufgrund verbesserter Zuverlässig- keit für alle Zuglinien	62
6.20 Fahrgastgewinne aufgrund verbesserter Zuverlässigkeit für alle Zuglinien	62

Tabellenverzeichnis

5.1	Darstellung der Verknüpfungsbedingungen der Datensätzen	30
6.1	Asymmetrie der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verspätungswerte (Schiefe)	43
6.2	Vergleich Basis-, Analyse- und Planfälle	54
6.3	Ergebnisse der drei Planfälle	59
A.1	Ausgewertete Regionalzugnummern und Fahrtverläufe	72
A.2	Übersicht über die GTFS-Textdateien und deren Informationen	75

Abkürzungsverzeichnis

BVWP	Bundesverkehrswegeplan
FG	Fahrgast
GIS	Geoinformationssystem
GTFS	General Transit Feed Specification
MIV	motorisierter Individualverkehr
NVBW	Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg
ÖV	öffentlicher Verkehr
RBT	Reliability Buffer Time
RR	Reliability Ratio
RP	Revealed-Preference
SP	Stated-Preference
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
VOR	Value of Reliability
VRS	Verband Region Stuttgart

1 Einleitung

Menschen sind für die Erreichung ihrer alltäglichen Ziele auf funktionierende Verkehrssysteme und Infrastrukturen angewiesen. Zugleich verursacht der Verkehrssektor einen erheblichen Anteil am weltweiten Energieverbrauch (29 % im Jahr 2020) und basiert überwiegend auf der Verbrennung fossiler Energieträger (Quadrelli et al., 2020). Hinzu treten Flächenversiegelung und die Zerschneidung von Lebensräumen durch die Verkehrsinfrastruktur sowie gesundheitsschädliche Emissionen wie Lärm und Feinstpartikel (Umweltbundesamt, n. d.). Um die daraus folgenden Risiken zu mindern und Emissionen wirksam zu senken, ist eine Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr hin zum öffentlichen Nah- und Fernverkehr sowie aktiven Mobilitätsformen erforderlich. Der öffentliche Verkehr bildet dabei das Rückgrat der Mobilitätswende, weil er die Mobilitätsbedürfnisse breiter Bevölkerungsgruppen abdecken kann. Voraussetzung für eine erfolgreiche Verlagerung ist jedoch ein zuverlässiges Angebot: Zuverlässigkeit zählt zu den zentralen Auswahlkriterien bei Verkehrsentscheidungen, wird in Verkehrsnachfragemodelle bislang aber nur selten berücksichtigt. Dadurch wird eine wichtige Komponente der Modus-, Routen-, und Abfahrtszeitpunktwahl vernachlässigt und Auswirkungen einer verbesserten Zuverlässigkeit durch betriebliche oder bauliche Maßnahmen können nicht dargestellt und quantifiziert werden (Oort et al., 2015; Swierstra et al., 2017). Die Relevanz von Zuverlässigkeit für die Optimierung der Nachfragemodellierung wurde auch in der Fortschreibung des Verkehrsmodell des VRS¹ aufgegriffen. Im Ausblick wird auf den Einfluss der Pünktlichkeit auf die Verkehrsentscheidungsmodellierung hingewiesen (Tritschler & Biechele, 2020).

Die Zuverlässigkeit ist darüber hinaus eine Bestimmungsgröße für die Bewertung der Qualität eines Verkehrssystems. Die als unzureichend wahrgenommene Zuverlässigkeit im deutschen Fernverkehr ist ein starker Kritikpunkt in der öffentlichen Debatte (Budras, 2025). Umgekehrt können verbesserte Zuverlässigkeitswerte Betriebskosten senken, die Netzauslastung erhöhen und damit Spielräume für niedrigere Fahrpreise, steigende Fahrgastzahlen und eine höhere Fahrgastbindung eröffnen (Dixit et al., 2019).

Es werden zwei Betrachtungsweisen von Zuverlässigkeit unterschieden. Reisezeit-zuverlässigkeit im Sinne von Pünktlichkeit gleicht die realen Ankunftszeiten mit den Fahrplanankunftszeiten ab oder wird durch die Einhaltung der geplanten Fahrzeugfolgezeit (Takt) beschrieben. Insbesondere auf hoch frequentierten Nahverkehrsstrecken

¹Verband Region Stuttgart

in Ballungsgebieten wird der Regelmäßigkeit des Verkehrsangebots eine höhere Bedeutung zugemessen als der genauen Befolgung der Fahrplanzeiten (Cats, 2014). Um den Einfluss der Reisezeitzuverlässigkeit auf der Angebots- und Nachfrageseite abbilden zu können, bedarf es aktualisierter Verkehrsmodelle, da bestehende Verkehrsmodelle diese Aspekte selten betrachten (Oort et al., 2015). Entscheidungsmodelle sind so anzupassen und zu erweitern, dass Nachfragewirkungen einer verbesserten Zuverlässigkeit in der Verkehrsmittel- und Routenwahl berechnet werden können. Die Herausforderung besteht hinsichtlich der Messung und Bewertung der Zuverlässigkeit der Reisezeit (Van Loon et al., 2011), weshalb in Studien verschiedene Ansätze erprobt werden (Axhausen et al., 2014; Klinkhardt et al., 2024; Li et al., 2017; Swierstra et al., 2017). Auf der Angebotsseite besteht die Anforderung Daten zur Zuverlässigkeit der Reisezeit für die Entscheidungsmodellierung bereitzustellen. An diese Punkte knüpft diese Masterarbeit an, in dem sie einen Beitrag zur Thematik des Einflusses der Reisezeitzuverlässigkeit auf die Verkehrsmittelwahl leistet und untersucht, welche Nachfrageeffekte durch eine verbesserte Zuverlässigkeit quantifiziert werden können. Dazu werden Verspätungen von Regionalzuglinien in das makroskopische Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart (VRS-Modell) integriert. Anhand dieser Verspätungswerte wird die Verkehrsmittelwahl mit angepassten Parametern modelliert. Ziel ist die Ergebnisse der veränderten Verkehrsmittelwahl für die Region Stuttgart abzubilden und Fahrgastgewinne durch eine verbesserte Zuverlässigkeit zu berechnen. Die Gliederung der Arbeit wird nun erläutert. Zuerst führt das Kapitel 2 in die makroskopische Verkehrsmodellierung und die Verfahren der Entscheidungsmodellierung ein. Kapitel 3 beschreibt zu berücksichtigende Aspekte bei der Integration von Reisezeitzuverlässigkeit in Verkehrsmittelwahlmodelle. Die Spezifika der Datengrundlage bestehend aus Verspätungsdaten, Ansätzen zur Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit, ÖV¹-Angebotsdaten und VRS-Nachfragemodell stellt Kapitel 4 dar. Die Methodik zur Erreichung des Forschungsziels erklärt das Kapitel 5. Die beschriebenen Schritte sind die Aufbereitung und Berechnung von Verspätungskennwerten, die Verknüpfung mit ÖV-Angebotsdaten und die anschließenden Integration in das VRS-Verkehrsmodell. Die Erkenntnisse aus der Anwendung der Methodik und die Modellergebnisse werden in Kapitel 6 vorgestellt. Die Prüfung der Modellergebnisse auf Plausibilität und mögliche Limitierungen erfolgt im Fazit (Kapitel 7). Im letzten Kapitel 8 werden Möglichkeiten zur Vereinfachung des Verfahrens und weitere entscheidungsrelevante Aspekte im Umgang mit Verspätungen erörtert.

¹ öffentlicher Verkehr

2 Theoretische Grundlagen der Verkehrsmodellierung

Nach der Einführung in die Grundlagen und Bewertungsansätze von Verkehrsnachfragemodellen werden Stated-Preference- und Revealed-Preference-Befragungen und Einsatzmöglichkeiten von Verkehrsmodellen beschrieben.

2.1 Ablauf der Verkehrsnachfragemodellierung

Makroskopische Verkehrsmodelle folgen typischerweise dem 4-Stufen-Schema (Erzeugung – Verteilung – Aufteilung – Umlegung). Die ersten drei Stufen stellen die Verkehrsnachfragemodellierung dar und die letzte Stufe ist die Verkehrsangebotsmodellierung (Treiber, 2023). Die Verkehrserzeugung berechnet für räumliche Verkehrszellen n , m den Quell- und Zielverkehr (aus- und einfließende Verkehrsströme) ausgedrückt durch Quell- (Q_n) und Zielsummen (Z_m) der Verkehrszellen. Die Verkehrsverteilung ermittelt eine Verkehrsstrommatrix, die die Anzahl an Wegen V_{nm} zwischen diesen Quell- und Zielzellen abbildet. Die Verkehrsaufteilung ermittelt für die Verkehrsstrommatrix die Aufteilung auf die verschiedenen Verkehrsmittel k (Modi). V_{nmk} sind alle Verkehrsströme von i nach j mit Verkehrsmittel k . Die Verkehrsumlegung belastet das Verkehrsnetz mit den Wegen zwischen den Verkehrszellen unter Berücksichtigung des genutzten Verkehrsmittels. Die Verkehrsstrommatrix wird also auf das Routennetz umgelegt (Treiber, 2023). Ein häufig nicht genutzter zusätzlicher Schritt stellt die Abfahrtszeitpunktwahl dar, die unter Berücksichtigung der Verkehrsbelastung einen Startpunkt für einen Weg bestimmt.

Die Ziel-, Modus- und Routenwahl zeichnen sich durch die Auswahl von einer konkreten Alternative durch einen Verkehrsteilnehmenden aus. Die Berechnung von Auswahlwahrscheinlichkeiten der Alternativen sind in der allgemeinen Form nach Keller (2014) so darstellbar:

$$(2.1) \quad p_{ij} = f(S_i, X_j)$$

mit:

- p_{ij} Auswahlwahrscheinlichkeit für Alternative j durch einen Verkehrsteilnehmenden i
- f Entscheidungsfunktion
- S_i Menge von Merkmalen des Verkehrsteilnehmenden
- X_j Menge von Merkmalen der Alternative j

Ökonometrische Entscheidungsmodellierung

Die beschriebene Entscheidungsfunktion unterscheidet zwischen Merkmalen der Alternativen und den Merkmalen und Präferenzen der Verkehrsteilnehmenden. Die Annahme in der ökonometrischen Entscheidungsmodellierung ist, dass die Verkehrsteilnehmenden den subjektiven Nutzen u_j durch die optimale Entscheidung für eine Alternative j maximieren möchten. Der subjektive Nutzen unterscheidet sich zwischen verhaltenshomogenen Gruppen u_{jg} und besteht aus zwei Beträgen. Der deterministische, objektive Nutzenbetrag v_{gj} ist für allen Personen innerhalb von g identisch. Der zufallsabhängige, stochastische Nutzenbetrag ε_{gj} dient zur Abbildung mangelnder Objektivität und individueller Präferenzen bei der Nutzenbewertung durch Personen innerhalb von g und wird häufig als Störterm bezeichnet. Der subjektive Gesamtnutzen u_{jg} wird durch die Addition der beiden Bestandteile berechnet.

$$(2.2) \quad u_{gj} = v_{gj} + \varepsilon_{gj}$$

Der deterministische Nutzenbetrag v_{gj} wird durch eine lineare Funktion bestehend aus mehreren Nutzenkomponenten berechnet:

$$(2.3) \quad v_{gj} = \alpha_{gj} + \beta_{1,g} \cdot x_{1,j} + \beta_{2,g} \cdot x_{2,j} + \dots = \alpha_{gj} + \sum_k \beta_{k,g} \cdot x_{k,j}$$

mit:

- α_{gj} Konstante der Alternative j für Personengruppe g
- $\beta_{k,g}$ Parameter als Gewichtung des Attributs k für Personengruppe g
- $x_{k,j}$ Wert des Attributs k für Alternative j

Die Berechnung der Wahlentscheidung wird mit einer Bewertungsfunktion ($f(v_j)$) und einer Aufteilungsfunktion (p_j) durchgeführt. Die Aufteilungsfunktion berechnet mit der Bewertungsfunktion die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative j :

$$(2.4) \quad p_j = \frac{f(v_j)}{\sum_{j \in J} f(v_j)} = \frac{\text{Bewertung des Nutzens von Alternative } j}{\text{Bewertungssumme der Nutzen aller } J \text{ Alternativen}}$$

mit:

p_j	Auswahlwahrscheinlichkeit für Alternative j
$f(v_j)$	Bewertungsfunktion des Nutzens
v_j	Nutzen der Alternative j

Bewertungsfunktionen

Die Bewertungsfunktion stellt "einen funktionalen Zusammenhang zwischen einer (zusammengefassten) Aufwandsgröße [Nutzen der Alternative] und der Akzeptanz der Alternative durch die Verkehrsteilnehmer her" (Dugge, 2006, S. 58). Die Bewertung basiert folglich auf zwei Größen: der Aufwandsgröße beziehungsweise Nutzenbetrag und der Bewertungsfunktion. Der funktionale Zusammenhang der Bewertungsfunktion versucht das menschliche Verhalten bei der Bewertung des Nutzens einer Alternative abzubilden. Je präziser die Wahl einer Alternative bestimmt werden kann, desto *valid* ist die Bewertungsfunktion. Verschiedene Bewertungsfunktionen sind dafür in der Literatur zu finden (Dugge, 2006). Das universale Logit-Modelle nutzt eine Exponentialfunktion zur Bewertung des Nutzens ($f(v_j) = e^{\beta \cdot v_j}$) und die Auswahlwahrscheinlichkeit wird durch die folgende Form berechnet:

$$(2.5) \quad p_j = \frac{e^{\beta \cdot v_j}}{\sum_{j \in J} e^{\beta \cdot v_j}}$$

mit:

e	natürliche Exponentialfunktion
β	Skalierungsparameter für Nutzenbetragsempfindlichkeit

Die Exponentialfunktion bewertet bei der Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeit die Differenz der Nutzenbeträge. Die Aufteilung ist folglich unabhängig von der Höhe der Beträge.

Hierzu unterscheidet sich das Kirchhoff-Modell, für das statt der Differenz der Nutzenbeträge das Verhältnis maßgeblich ist. Das Kirchhoff-Modell verwendet eine Potenzfunktion zur Bewertung des Nutzens ($f(v_j) = v_j^\beta$). Die Aufteilungsfunktion ist:

$$(2.6) \quad p_j = \frac{v_j^\beta}{\sum_{j \in J} v_j^\beta}$$

Um ein realistischeres Auswahlverhalten abzubilden, haben Lohse und Schnabel (2011) die EVA-Funktion eingeführt. Die EVA1-Funktion ähnelt der Potenzfunktion (2.6) und kann über drei Parameter an verschiedene Entscheidungssituationen angepasst

werden:

$$(2.7) \quad f(v_j) = \frac{1}{(v_j)^{\phi(v_j)}} \text{ mit } \phi(v_j) = \frac{E}{1 + \exp(F - G * v_j)}$$

mit: E, F, G Parameter

Mit der Funktion $\phi(v_j)$ und den Parametern E, F, G wird eine Halbglockenkurve gebildet. Im Bereich von hohen Nutzenbeträgen reagiert die Bewertungsfunktion (2.7) bei einer absoluten Änderung des Nutzens nur sehr schwach, führt also zu geringen Handlungselastizitäten. Dies ist insbesondere in der Verkehrsverteilung sichtbar. Ziele die in unmittelbarer Nähe zu Quelle liegen und geringe Unterschiede der Entfernung zueinander haben, weisen in der Bewertung nur geringe Unterschiede auf. Danach nimmt die Handlungselastizität zu, also die Reaktion der Bewertung von entfernteren Ziele (sinkender Nutzen) wird stärker, bis ein Grenzwert erreicht wird. Ab diesem Punkt (kleine Nutzenbeträge) ist die Handlungselastizität konstant. Das heißt die Reaktion der Bewertung unterscheidet sich ab einer bestimmten Entfernung nicht mehr zwischen den Zielen. Die EVA2- und EVA3-Funktionen sind weiterentwickelte Funktionen zur Abbildung von Entscheidungssituationen (Dugge, 2006). Weitere Bewertungsfunktionen sind die Logarithmus-Funktion und die Box-Cox- und Box-Tukey-Transformation (Lohse & Schnabel, 2011).

2.2 Stated-Preference- und Revealed-Preference-Befragungen

Das Wahlverhalten in Entscheidungssituationen ist vom Nutzenbetrag bzw. der Aufwandsgröße der verfügbaren Alternativen abhängig. Eine Aufteilungsfunktion berechnet Auswahlwahrscheinlichkeiten für eine diskrete Anzahl an Alternativen über den bewerteten Nutzen oder Aufwand und bildet damit die Grundlage für die Modus-, Routen- oder Abfahrtszeitpunktwahl. Um Entscheidungen möglichst realitätsnah abzubilden und die Komponenten des Nutzenbetrags abzuschätzen werden häufig RP¹- und SP²-Befragungen durchgeführt (Li et al., 2017). RP-Daten beziehen sich auf tatsächlich beobachtete Präferenzen in realen Situationen. Demgegenüber erheben SP-Befragungen Daten aus hypothetischen Wahlsituationen, in denen Befragte angeben, welche bestimmten (kontrolliert variierten) Auswahlmöglichkeiten sie präferieren würden. Beide Methoden sind mit spezifischen Vorteilen und Begrenzungen bei der Datenerhebung

¹ Revealed-Preference

² Stated-Preference

und -qualität verbunden. Der Vorteil von RP-Befragungen liegt in der Offenlegung von realem Verhalten. In der Praxis ist die Analyse durch die tatsächlich verfügbaren Optionen und die, als relevant erachteten, Attributvariationen der Befragungen limitiert. Attribute, die schwierig zu quantifizieren sind (z. B. wahrgenommene Qualität, Zuverlässigkeit, Bequemlichkeit) oder denen keine signifikante Wirkung auf das Wahlverhalten zugeschrieben wird, werden nur unzureichend in Befragungen gemessen und bewertet. Zudem tritt das „New-Option“-Problem auf: "whereby it is required to forecast the likely usage of a facility not available at present and perhaps even radically different to all existing ones" (Ortúzar S. & Willumsen, 2011, S. 21). Innovative Mobilitätsoptionen, wie On-Demand-Verkehre, oder die Auswirkungen der Reisezeitzuverlässigkeit auf das Wahlverhalten fallen aus dem Blickfeld der Befragung. SP-Befragungen können RP-Daten an dieser Leerstelle komplementieren. Die Beobachtung hypothetischer Situationen erlaubt so viel Variation je Attribut, wie forschungsseitig sinnvoll erscheint. Damit können Wahlmodelle für neue Mobilitätsoptionen oder weitere Attributausprägungen geschätzt werden, für die keine RP-Daten existieren. Die Problematik der Befragung ist die Abweichung zwischen dem tatsächlichen und dem, in der Befragung angegeben, Verhalten. Fraglich ist, ob Menschen sich im Alltag genauso wie in hypothetischen Befragungssituationen verhalten. Zudem können ihre Antworten durch die Interviewsituation und einer dabei wahrgenommenen Erwartungshalten durch den Interviewenden beeinflusst sein (Train, 2001). Dieses Problem ist in der sozialwissenschaftlichen Methodik bekannt und wird als *responses bias* bezeichnet. Es bestehen mehrere Methoden, um solche Antworttendenzen in Befragung zu minimieren (Paulhus, 1991). In der Praxis hat sich eine Kombination der beiden Befragungstypen als zielführend herausgestellt (Ortúzar S. & Willumsen, 2011). SP-Befragungen bestimmen die Bandbreite der Attributvariationen und relative Gewichtung der Attribute für die Wahlentscheidung. Ziel ist die Integration aller Attribute, die für das Wahlverhalten maßgeblich sind. RP-Daten dienen zur Bestimmung der Alternativkonstanten und Festlegung der Basisanteile der Alternativen, die den real beobachteten Auswahlwahrscheinlichkeiten entsprechen. So wird verhindert, dass aufgrund der Betrachtung zusätzlicher Attributvariationen das berechnete Wahlverhalten von dem tatsächlichen Verhalten abweicht. Um Daten für eine konkrete Wahlsituation mit mehreren diskreten Alternativen zu erheben, werden Stated-Choice-Experimente durchgeführt. Beispiele für die Implementierung von Stated-Choice Experimenten ist die Erhebung von Verkehrsmoduswahlpräferenzen unter Berücksichtigung von neuen Mobilitätsformen wie autonomen Bussen oder On-Demand-Angeboten (Klinkhardt et al., 2024). Diese Präferenzen können nicht durch RP-Befragungen erhoben werden.

2.3 Einsatzmöglichkeiten von Verkehrsmodellen

Verkehrsmodelle werden zwischen Bestands- oder Prognosemodell unterschieden. Ein Bestandsmodell beschreibt den gegenwärtigen Zustand des Verkehrssystems. Es bildet die aktuelle Verkehrsnachfrage, das bestehende Netzangebot und das beobachtete Verkehrsverhalten ab. Es dient der Kalibrierung und Validierung, also der Überprüfung, ob das Modell reale Verkehrszustände hinreichend genau reproduzieren kann. Grundlage dafür sind empirische Daten (z. B. Verkehrszählungen, Reisezeiten, ÖPNV-Fahrgastzahlen). Bestandsmodelle sollen Hinweise zum Verständnis des aktuellen Verkehrsgeschehens liefern. Im Gegensatz dazu dient ein Prognosemodell der Abbildung zukünftiger Entwicklungen. Es baut auf dem kalibrierten Bestandsmodell auf und nutzt Annahmen zu sozioökonomischen, demografischen und infrastrukturellen Veränderungen (z. B. Bevölkerungswachstum, neue Siedlungsgebiete oder Fahrplanänderungen) und berechnet dafür zukünftige Verkehrsströme und Nachfrageveränderungen. Prognosemodelle sind für Nutzen-Kosten-Untersuchungen ein wichtiges Hilfsmittel, da sie quantitative Grundlagen für die Bewertung zukünftiger verkehrlicher und volkswirtschaftlicher Wirkungen von Infrastruktur- und Angebotsmaßnahmen bieten. So berechnen Verkehrsmodelle die Wirkungen anhand von verkehrssituationsbeschreibenden Kenngrößen (z. B. Reisezeiten, Streckenbelastungen, Unfallzahlen), die als Verkehrsmengengerüst bezeichnet werden. Anschließend erfolgt die Monetarisierung dieser Wirkungen. Auf Grundlage von Streckenbelastungen werden z. B. Schadstoffemissionen berechnet, welche durch die Multiplikation mit Wertansätzen monetär bewertet werden. Diese monetarisierten Wirkungen je Kenngröße werden entweder der Nutzen- oder der Kostenseite des untersuchten Projektes zugeordnet (Dahl et al., 2016).

Die Beurteilung von verkehrlichen Wirkungen von Infrastruktur- und Angebotsmaßnahmen entstehen nach dem Ohnefall-Mitfall-Prinzip. Der Ohnefall beschreibt den gegenwärtigen "Zustand der Verkehrsinfrastruktur und zusätzlich das Bedienungsangebot der fahrplanbasierten Verkehrsmittel ohne Umsetzung des zu bewertenden Projektes" (ebenda, S. 31). Weiterhin umfasst der Ohnefall Projekte, die sich schon in der Ausführungen befinden oder bei denen bis zum Prognosehorizont mit dem Bau begonnen wird und solche für die eine verbindliche Finanzierungs- und Planungsgrundlage existiert. Zudem sind alle zukünftigen Entwicklungen die sich auf die Nachfrage auswirken, im Ohnefall abzubilden, z. B. neue Siedlungs- und raumplanerische Projekte oder verkehrspolitische Vorhaben, wie Maßnahmen zur Steuerung des ruhenden Verkehrs. Der Mitfall beschreibt den gegenwärtigen "Zustand der Verkehrsinfrastruktur und zusätzlich das Bedienungsangebot der fahrplanbasierten Verkehrsmittel mit Umsetzung des zu bewertenden Projektes" (ebenda, S. 31). Die Wirkungen des Planfalls werden denen des Ohnefalls gegenübergestellt. Die Idee ist, dass die Wirkungen nur dem zu

bewertenden Verkehrsprojekt zugeordnet werden und nicht mit weiteren Maßnahmen zusammenhängen. Nachfrageunterschiede zwischen Ohne- und Mitfall verfälschen die Wirkungen und die Bewertung. Nutzen-Kosten-Untersuchungen können aus mehreren Planfällen bestehen, wenn unterschiedliche Varianten betrachtet werden. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Ausführung der Infrastrukturmaßnahme oder des Betriebskonzepts. Die Betrachtung von Szenarien dient der Abbildung von zukünftigen Rahmenbedingungen, die sich auf die Verkehrsprognose und die Bewertung von Infrastrukturprojekten auswirken. Diese alternative Zukunftsbilder (z. B. unterschiedliche wirtschaftliche Entwicklungen, Annahmen über das Bevölkerungswachstum oder Energiepreisentwicklungen) werden hinsichtlich ihre Auswirkungen auf das Verkehrssystem analysiert.

3 Integration von Reisezeitzuverlässigkeit in die Verkehrsmittelwahl

In diesem Kapitel wird zuerst die Reisezeitzuverlässigkeit als Entscheidungsgröße in der Verkehrsmittelwahl erläutert. Danach werden Ansätze zur Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit dargestellt. Anschließend wird basierend auf drei Stated-Choice-Studien ein Ansatz zur Beantwortung der Forschungsfrage ausgewählt.

3.1 Reisezeitzuverlässigkeit als Variable der Verkehrsmittelnutzenfunktion

Das Ziel der Masterarbeit ist die Wirkung der Zuverlässigkeit der Reisezeit auf die Verkehrsmittelwahl abzubilden. Hierzu ist die Entscheidungsmodellierung um diesen Faktor zu erweitern. Zuverlässigkeit stellt eine der wichtigsten Attribute in der Bewertung der Servicequalität von Verkehrsoptionen dar und hat einen großen Einfluss auf das Verkehrsverhalten (Jackson & Jucker, 1982). Sie ist ein wichtiger Faktor für die Modellierung der Verkehrsmittelwahl und sollte in Kosten-Nutzen-Untersuchungen berücksichtigt werden (Klinkhardt et al., 2025). Dies gilt insbesondere für den öffentlichen Verkehr: "reliability is the most important quality attribute of public transport influencing travelers' choice behaviors" (Li et al., 2017, S. 252). Nash und Hille (1968) haben die Bewertung von Zuverlässigkeit in der Verkehrsmittelwahl sehr allgemein definiert. Jackson und Jucker (1982) konkretisieren diesen Faktor und beziehen ihn auf die Reisezeit. Praktisch wird die Reisezeitzuverlässigkeit als Variable in die Nutzenfunktionen von Verkehrsentscheidungsmodellen integriert. Treiber (2023) unterscheidet zwischen generischen, sozioökonomischen, alternativenspezifischen und externen Variablen. Generische Variablen werden durch die Alternative und die Person beschrieben. Sie sind die klassischen Eingangsgrößen einer Verkehrsmittelnutzenfunktion: Reisezeit, Reisekosten (Ghader et al., 2019; Li et al., 2017). Reisezeitzuverlässigkeit, Komfort oder der Besetzungsgrad/Auslastung eines Verkehrsmittels (*in-vehicle crowding*) sind weitere Variablen, die berücksichtigt werden können. Sozioökonomische Variablen sind nur von der Person abhängig: Geschlecht, Alter, Einkommen, etc. Sie können beliebig diversifiziert werden. So hat der Autobesitz, der Besitz einer Zeitkarte für den öffent-

lichen Verkehr oder das Reisen mit viel Gepäck Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl (Klinkhardt et al., 2025). Alternativenspezifische Konstanten beinhalten "systematische[] Einflussfaktoren, welche nicht explizit berücksichtigt wurden" (Treiber, 2023, S. 97). Diese werden in der linearen Nutzenfunktion (2.3) durch α_j beschrieben. Externe Variablen sind globale Einflussfaktoren und bilden das Wetter oder spezifische Bedingungen im Tages- und Jahresverlauf ab. Die Reisezeitzuverlässigkeit stellt einen generischen Faktor dar. Die Reisezeit und seine Variabilität werden als unangenehm empfunden und Reisende versuchen in ihrem Verkehrsverhalten beide Einflussgrößen zu reduzieren. Dies geschieht durch eine angepasste Verkehrsmittel-, Routen- oder Abfahrtszeitpunktwahl (Hollander, 2006). Verschiedene Ansätze zur Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit in Verkehrsentscheidungsmodellen werden in dem folgenden Kapitel 3.2 beschrieben.

3.2 Ansätze zur Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit

Es existieren verschiedene Ansätze zur Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit in Nutzenfunktionen. Die zentrale Annahme ist, dass die Variabilität der Reisezeit sich negativ auf die Entscheidung für eine Alternative auswirkt. Die Ansätze unterscheiden sich durch die Messung und Operationalisierung der Reisezeitzuverlässigkeit.

In der Literatur gibt es den *mean-variance approach* auch bekannt als *centrality-dispersion approach*, der der Reisezeitvariabilität einen negativen Nutzen zuweist. Brastow and Jucker haben diesen Ansatz für die Modellierung der Routenwahl verwendet (Brastow and Jucker, 1977, zitiert nach Jackson und Jucker, 1982). Das Modell bewertet die mittlere Reisezeit (mean travel time) und die Streuung (Dispersion). Typischerweise wird als Streuungsmaß die Standardabweichung genutzt (Klinkhardt et al., 2025; Li et al., 2017). Ein weiterer Ansatz ist der *scheduling approach*, dabei versuchen Reisende den negativen Effekt von Reisezeitschwankungen durch die Wahl des Abfahrtszeitpunktes zu reduzieren. Dabei wird dem zu frühen oder zu späten Ankommen am Zielort ein negativer Nutzen zugeordnet, den es zu minimieren gilt (Hollander, 2006). Gaver (1968) hat dieses Konzept entwickelt und Bates et al. (2001) haben es in ein Discrete-Choice-Modell für die Wahl des Abfahrtszeitpunktes integriert. Die Betrachtung von *RBT*¹ unterscheidet sich von den bisherigen Ansätzen durch die Bewertung einer Pufferzeit. Diese wird durch die Differenz zwischen der mittleren Reisezeit und z. B. dem 90%-Quantil dargestellt. In dieser zusätzlichen Reisezeit als Puffer erreichen die Reisenden in 9 von 10 Fällen ihr Ziel. Die Reisenden wählen die Option mit der geringsten Reisezeitabweichung (geringste Pufferzeit) aus. Verschiedene Studien haben die Operationalisierung von *RBT* (Dixit et al., 2019) und

¹Reliability Buffer Time

die Integration von *RBT* in Verkehrsnachfragemodelle untersucht (Swierstra et al., 2017). Ein vergleichsweise simpler Ansatz integriert die Reisezeitzuverlässigkeit in die Nutzenfunktion über die Betrachtung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verspätungen. "Die Wahrscheinlichkeit einer Verspätung wird mit der Verspätung der verspäteten Reisen multipliziert" (Axhausen et al., 2014, S. 109). Ähnlich können Reisezeitabweichungen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Reisezeiten inklusive Verspätungen analysiert werden. Dabei stellt die Reisezeitzuverlässigkeit keinen zusätzlichen Faktor in der Nutzenfunktion dar, sondern die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen gemessenen Reisezeiten werden mit den Reisezeiten und dem Parameter für die Reisezeit multipliziert (Ghader et al., 2019). Der Nutzen von verbesserter Reisezeitzuverlässigkeit kann durch eine Zahlungsbereitschaft für Zuverlässigkeit (*VOR*¹) monetarisiert werden. Reisende sind bereit einen bestimmten Betrag für geringe Reisezeitschwankungen zu bezahlen. Dieser Betrag ist abhängig von dem Indikator der Messung der Reisezeitvariabilität (Standardabweichung, Varianz, *RBT*, Wahrscheinlichkeitsverteilung von Verspätungen) und wird durch Befragungen bestimmt (Axhausen et al., 2014; Li et al., 2017). Solche Erhebungen betrachten den Einfluss von soziodemografischen Determinanten, Fahrtzwecken, Einkommen, Reisebegleitumständen oder regionalen Unterschieden. Die dabei ermittelten Zeitwerte differenzieren sich nach Verkehrsmittel und können zur Berechnung des monetären Nutzens in Nutzen-Kosten-Untersuchungen und in Nutzenfunktionen in der Entscheidungsmodellierung verwendet werden (Kouwenhoven et al., 2014). König et al. (2004) haben mehrere Studien zum *VOR* aus den Ländern Großbritannien, Niederlande, Schweden, Norwegen, Finnland, Dänemark und der Schweiz ausgewertet und zusammengefasst. Weitere Ansätze betrachten die Fahrplanzeiten plus eine mittlere Verspätung am Zielort (*mean-lateness*) (Carrion & Levinson, 2012). Die Operationalisierung der genannten Indikatoren ist teilweise schwierig umzusetzen. Ein einfacher Zugang für die Modellierung ist es modusabhängige Variablen im Verhältnis zur Reisezeit zu bewerten. Diese sogenannten Austauschverhältnisse werden durch Befragungen ermittelt. Konkret bedeutet das, dass zum Beispiel eine Zeiteinheit der Wartezeit x-mal negativer als eine Zeiteinheit Reisezeit bewertet wird. Die Variablen für diese Austauschverhältnisse können der Takt, Anzahl der Umstiegsvorgänge, Zu-, Abgangs-, Warte-, Umstiegszeiten und Reisezeitabweichungen sein und werden differenziert nach Fahrtzweck ermittelt. Das Verhältnis des Parameters der Varianz der Reisezeit zum Parameter der Reisezeit wird als RR^2 bezeichnet (Axhausen et al., 2014). Zu beachten ist, dass sich das Verhältnis durch die Beschreibung der Reisezeitvariabilität (Mittlere Verspätung, Standardabweichung) verändert. Die Integration dieser Austauschverhältnisse in eine Nutzenfunktion stellt einen intuitiven Zugang zu der Bewertung unterschiedlicher Variablen (z. B. Reisezeitschwankungen)

¹Value of Reliability

²Reliability Ratio

dar. Reisende können bei der Bewertung des Nutzens nicht alle möglichen Resultate und deren Auftrittswahrscheinlichkeit abschätzen. Das ist jedoch die grundlegende Prämisse des Nutzenmaximierungsmodells. Die Wahlentscheidung wird also unter unsicheren Bedingungen getroffen, ohne dass alle Konsequenzen einer Entscheidung vorher abgeschätzt werden können. Eine Strategie sei deshalb das Minimieren von Risiken im Umgang mit Reisezeitabweichungen (Ghader et al., 2019). Weitere Strategien sind die Reduktion von Umstiegen oder die Wahl von Verbindungen mit einer hohen Taktfrequenz. Entsprechende Modelle berücksichtigen diese Faktoren in der Entscheidungsmodellierung (Swierstra et al., 2017).

3.3 Stated-Choice-Experimente zur Reisezeitzuverlässigkeit

Zur Untersuchung der Wirkung der Reisezeitzuverlässigkeit auf das Verkehrsverhalten werden nachfolgend Methodik und präferenzbezogene Ergebnisse dreier Stated-Choice-Studien skizziert: Axhausen et al. (2014), Klinkhardt et al. (2025) und Li et al. (2017). Gemeinsam ist den Studien, dass sie die relevanten Attribute der Verkehrsmittelwahl erheben und Parameter für die Berechnung des Nutzenbetrags schätzen. Die Studien unterscheiden sich in der Abbildung der Reisezeitzuverlässigkeit in den Fragebögen und in der Messgröße. In einer Studie zur Ermittlung von Bewertungsansätzen für den deutschen BVWP¹ werden Parameter für die Verkehrsmittel-, Routen- und Abfahrtszeitwahl erhoben. Die Reisezeitvariabilität wird als grobe Wahrscheinlichkeitsverteilung der Pünktlichkeitswerte bzw. Ankunftszeiten tabellarisch in den Befragungsbögen dargestellt. Die Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit basiert auf Parametern für die Verspätungsdauer [min] (-0,002) und die Verspätungswahrscheinlichkeit [min] (-0,010) für den ÖV und auf der Standardabweichung (-0,008) für den MIV². Der Parameter der Reisezeitvariabilität hat ein Verhältnis zur Reisezeit (RR) von 0,9. Weitere ÖV relevante Parameter sind Reise-, Zu-/Abgangs-, Umsteigewartezeiten und Umstiegsvorgänge sowie der Takt und die Auslastung (Axhausen et al., 2014). Eine Stated-Choice-Befragung in Shanghai zu Moduswahlpräferenzen für die Modi (Auto, Metro, P&R, Bus) visualisiert die Verteilung der Reisezeiten je Modi mit Histogrammen. Die Experimente identifizieren die mittlere Reisezeit, Reisezeitzuverlässigkeit, Reisekosten und ÖV-Besetzungsgrad als relevante Attribute. Die geschätzten Zuverlässigkeitsparameter (Indikator: Standardabweichung) sind für die Metro mit -0,144 am höchsten und für den Bus am geringsten: -0,060. Die Modi Auto (-0,082) und P&R (-0,078) liegen dazwischen. Der RR -Wert variiert nach Modi. Das Verhältnis unterscheidet zudem zwischen hohem und geringem Besetzungsgrad und bildet eine

¹Bundesverkehrswegeplan

²motorisierter Individualverkehr

Spannweite von 1,47 (Metro mit geringem Besetzungsgrad) bis 2,0 (Bus mit hohem Besetzungsgrad) ab (Li et al., 2017). Die online durchgeführte Stated-Choice-Befragung von Klinkhardt et al. (2025) erhebt Moduswahlpräferenzen mit Fokus auf den Einfluss der Reisezeitzuverlässigkeit für Baden-Württemberg mit Schwerpunkt auf die Region Mannheim und Ludwigshafen. Zur praxisnahen Darstellung werden in der Befragung mögliche Verspätungen grafisch durch Balken abgebildet. Analog zu (Axhausen et al., 2014; Li et al., 2017) zeigt sich eine modusspezifisch unterschiedliche Bewertung der Zuverlässigkeit. Für den ÖV wird die mittlere Verspätung [min] mit -0,111 bewertet, für den MIV die Standardabweichung [min] mit -0,0504. Das Verhältnis bei der Bewertung der Reisezeitvariabilität zur Reisezeit (RR) beträgt 3,7. Der Vergleich der Parameter für die Reisezeitzuverlässigkeit variiert zwischen den Studien. Die Parameter sind aufgrund unterschiedlicher Indikatoren nicht vergleichbar. Auffallend ist jedoch, dass in der BVWP-Studie der RR -Wert auffallend gering ist. Die Studien von Li et al. (2017) und Klinkhardt et al. (2025) weisen je nach Modi höhere Werte auf. Angesichts der in Kapitel 3.1 beschriebenen Relevanz der Reisezeitzuverlässigkeit für das Verkehrsverhalten weisen höhere RR -Werte auf eine realistischere Abschätzung des Wahlverhaltens hin. Die Unterschiede können auf die verschiedenen geografischen Räume oder die Messgrößen und Darstellung der Reisezeitabweichung in den Befragungen zurückzuführen sein. Zudem sind die Erhebungen in verschiedenen Jahren durchgeführt worden. Im nächsten Kapitel 3.4 wird die Auswahl eines Verkehrsmittelwahlmodells zur Beantwortung der Forschungsfrage begründet.

3.4 Angewandter Ansatz zur Integration der Reisezeitzuverlässigkeit

In den bisherigen Kapiteln wurde die Bedeutung der Reisezeitzuverlässigkeit für das Verkehrsverhalten herausgearbeitet. Das Ziel ist nun dieses Verkehrsverhalten durch ein geeignetes Verkehrsmittelwahlmodell adäquat abzubilden. Die in Kapitel 3.3 beschriebenen Studien haben Parameter für die Reisezeitzuverlässigkeit für Entscheidungsmodelle geschätzt (Axhausen et al., 2014; Klinkhardt et al., 2025; Li et al., 2017). Die von Klinkhardt et al. (2025) erhobenen Moduswahlpräferenzen zeigen sich zur Erreichung des Forschungsziel am geeignetsten. Dies erklärt sich durch den räumlichen Fokus auf die Region Baden-Württemberg. Inhaltlich ist die Berücksichtigung der unterschiedlichen Wahrnehmung von Reisezeit und dessen Abweichung abhängig vom genutzten Verkehrsmittel ein zielführender Ansatz zur Beantwortung der Forschungsfrage:

"The distinction between the model for the car alternative and the model for the public transportation alternative can be explained by the differing

perceptions of travel time in private car use versus public transport. One hypothesis is that certain regular delays in car traffic are perceived as "normal" and thus more acceptable, where as significant variability in travel time is viewed negatively. In contrast, regular delays in public transportation appear less tolerable" (Klinkhardt et al., 2025, S. 6).

Aufgrund der unterschiedlichen Wahrnehmung von regelmäßig auftretender Verspätung werden für das Verkehrsmittel Auto ein *mean-dispersion model* und für öffentliche Verkehrsmittel ein *scheduling model* verwendet. Das *mean-dispersion model* erweitert die Nutzenfunktion um die Attribute: mittlere Reisezeit (mean travel time TT_{mean}) und Streuung (dispersion D):

$$(3.1) \quad u_{mean_dispersion_model} = \alpha_{gj} + \beta_{1,g} \cdot x_{1,j} + \dots + \beta_{n,g} \cdot x_{n,j} + \beta_{tt} \cdot TT_{mean} + \beta_d \cdot D$$

mit:

β_{tt}	Parameter für die mittlere Reisezeit
TT_{mean}	Attribut der mittleren Reisezeit
β_d	Parameter für die Streuung
D	Attribut der Streuung

Das Modell für den öffentlichen Verkehr verwendet die zusätzlichen Attribute der Fahrplanreisezeit (scheduled travel time TT_s) und der zusätzlichen mittleren Verspätung (mean delay TT_{dm}):

$$(3.2) \quad u_{scheduling_model} = \alpha_{gj} + \beta_{1,g} \cdot x_{1,j} + \dots + \beta_{n,g} \cdot x_{n,j} + \beta_{tt_s} \cdot TT_s + \beta_{tt_dm} \cdot TT_{dm}$$

mit:

β_{tt_s}	Parameter für die Fahrplanreisezeit
TT_s	Attribut der Fahrplanreisezeit
β_{tt_dm}	Parameter für die zusätzliche mittlere Verspätung
TT_{dm}	Attribut der zusätzlichen mittleren Verspätung

Das *scheduling model* wird verwendet, um basierend auf Verspätungsdaten den Einfluss der Reisezeitvariabilität auf die Verkehrsmittelwahl abzubilden. Die Berechnung der Verkehrsmittelwahl kann in einem Prognose- oder Bestandsmodell erfolgen. Ein Bestandsmodell beinhaltet die aktuelle Nachfrage und das aktuelle ÖV-Angebot. Der Vorteil ist, dass die Verspätungsdaten einfach in das Modell einzubinden sind, wenn der Zeitpunkt der Datenerfassung mit dem Zeitpunkt der Modellerstellung zusammenfällt. Dies kann für aktuelle Verspätungsdaten und einem laufend aktualisierten Modell einfach gewährleistet werden. Die Abbildung von Reisezeitzuverlässigkeitsverbesserungen ist jedoch nur für Maßnahmen möglich, die kurzfristig im Bestand durch betriebliche Änderungen umgesetzt werden können.

Bauliche Maßnahmen, die eine längere Errichtungszeit voraussetzen, können nur mit einem Prognosemodell abgebildet werden. Dieses bietet den Vorteil, dass Aussagen über die Auswirkungen von Zuverlässigkeitsverbesserungen für zukünftige Projekte und veränderte Rahmenbedingungen getroffen werden können. Hier ist die Szenarien- und Variantenuntersuchung ein wichtiger Anwendungsfall. Dabei besteht jedoch das Problem, dass die Zuverlässigkeit von Verkehrssystemen schwierig für zukünftige Vorhaben und Rahmenbedingungen antizipiert werden kann. Bei der Planung des Baus einer neuen Strecke oder einer neuen ÖV-Linien ist die Zuverlässigkeit durch aufwendige Simulationen abzuschätzen. Grundsätzlich wird bei Verkehrsmodellen von einem pünktlichen Betrieb ausgegangen (Klinkhardt et al., 2025). Verspätungsdaten können in ein Verkehrsmodell durch zwei Möglichkeiten integriert werden. Entweder werden im Modellaufbau schon ÖV-Linien mit Verspätungsdaten integriert. Vergleichbar zu den Fahrzeiten können diese innerhalb des Modells aktualisiert werden. Eine weitere Option ist der nachträgliche Import von Verspätungsdaten, wenn im Bestandsmodell keine Verspätungsdaten vorliegen. Für die Berechnung der Wirkungen von Verspätungen auf die Verkehrsmittelwahl werden ein Ohnfall mit Mitfällen verglichen. Zuverlässigkeitsverbesserungen können aufgrund eines höheren Automatisierungsgrades oder neuer Fahrwegtechnik pauschal für ein ganzes Verkehrssystem angenommen werden. Diese Verbesserungen werden durch einen Prognosenullfall abgebildet. Konkrete Maßnahmen wie die Implementierung eines neuen Stellwerks, die Automatisierung einer ÖV-Linie oder die Ausstattung von Schienenstrecken mit European Train Control System (ETCS) stellen Mitfälle dar. Die verwendete Modellgrundlage zur Beantwortung der Forschungsfrage ist das Prognosemodell des VRS. Das nächste Kapitel 4 beschreibt das Modell und die weiteren notwendigen Datengrundlagen.

4 Datengrundlage

Dieses Kapitel nennt die wesentlichen Daten, auf deren Grundlage in dieser Masterarbeit die Berechnung der Verkehrsmittelwahl unter Berücksichtigung der Reisezeitzuverlässigkeit erfolgt. Die Angebotsdaten werden mit den berechneten Verspätungsdaten verknüpft und anschließend in das makroskopische Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart importiert.

4.1 Makroskopisches Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart

Das makroskopische Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart liegt als *PTV VISUM*-Modell vor. Zuerst wird der allgemeine Ablauf der Verkehrsnachfragemodellierung der Software *PTV VISUM* beschrieben. Anschließend erfolgt die Beschreibung des Modells und der implementierten Verkehrsmittelnutzenfunktion.

Ablauf der Verkehrsnachfragemodellierung

PTV VISUM ist eine Modellsoftware, die zur Darstellung der Verkehrsnachfrage und zur Berechnung von Verkehrsprognosen genutzt wird. Das *PTV VISUM*-Verfahren *VISEM* beinhaltet die drei Stufen: Verkehrserzeugung¹, -verteilung² und -aufteilung³. Die räumlich differenzierte Berechnung der Verkehrsnachfrage basiert auf Aktivitätenketten. Mobile Personen bewegen sich im Alltag zu Zielen, um dort Aktivitäten nachzugehen. Für die Ausübung dieser Abfolge typischer Aktivitäten an einem Tag (Aktivitätenkette) wird für unterschiedliche verhaltenshomogene Gruppen (Personengruppe) eine Wahrscheinlichkeit angegeben. So ist es beispielsweise sehr wahrscheinlich, dass eine Person aus der Gruppe "01QmP: Qualifizierte erwerbstätige Person mit Pkw", die Aktivitätenabfolge WAW: Wohnen – Arbeiten – Wohnen durchführt. Basierend auf diesen Personengruppen und deren Aktivitätenketten werden die Wege (bzw. Wegeketten bei der Verknüpfung mehrerer Aktivitäten) und Ziele berechnet. Da das

¹Berechnung des verkehrszellenfeinen Verkehrsaufkommens

²Bestimmung der Wegeziele für dieses Verkehrsaufkommen

³Bestimmung der Wahl der Verkehrsmittel für die Wege zwischen den Zellen

Ziel auch Auswirkungen auf die Moduswahl hat, werden die Verkehrsverteilung und -aufteilung in *VISEM* kombiniert durchgeführt. Die Schritte sind Wahlentscheidungen, die durch eine Bewertungs- und Aufteilungsfunktion berechnet werden. Das Ergebnis sind Nachfragematrizen (Aktivitäts-, Moduswahl- und Verteilungsmatrix) die auf unterschiedlichen Maßstabsebenen aggregiert werden. Für die Moduswahl werden Matrizen berechnet, die für jeden Modi in Kombination mit den Personengruppen die Nachfrage abbilden. Diese Matrizen können nach Zielaktivität differenziert werden. Zum Beispiel bildet die Moduswahlmatrix "01QmP x OeV" die Nachfrage von qualifizierten erwerbstätigen Personen mit Pkw-Besitz ab, die dem ÖV den größten Nutzen auf den jeweiligen Bezirksbeziehungen zuordnen. Die Moduswahl stellt eine ökonomische Entscheidungssituation dar, da die verhaltenshomogenen Personengruppen bei ihren Wegeketten versuchen das Verkehrsmittel mit dem größten Nutzen zu wählen (siehe Kapitel 2.1). Dieser Nutzen ist abhängig von

- sozioökonomischen Merkmalen und der Modusverfügbarkeit der verhaltenshomogenen Personengruppen (sozioökonomische Variablen)
- den Attributen der Modi in Abhängigkeit von der Zielwahl (generische Variablen)
- Einschränkungen der Wahlfreiheit innerhalb von Wegeketten

und wird für die unterschiedlichen Modi einzeln berechnet. Die Einschränkung der Wahlfreiheit innerhalb von Wegeketten bestimmt das Problem, dass die Wahlfreiheit durch die erste Wahl eines Modi eingeschränkt sein kann. Unterschieden wird zwischen

- austauschbaren Modi (Fuß, Pkw-Mitfahrer, ÖV, Sharing-Dienst)
- nicht austauschbaren Modi (Pkw, Rad)

Beim ersten Weg einer Wegekette wird der Nutzen für alle Modi mit einer Bewertungsfunktion berechnet. Danach wird, basierend auf einer Aufteilungsfunktion, ein Modus ausgewählt. Für die austauschbaren Modi können bei jedem weiteren Weg der Wegekette die anderen austauschbaren Modi ausgewählt werden. Für die nicht austauschbaren Modi gilt die Annahme, dass für alle weiteren Wege dieser Modus genutzt wird (PTV Group, 2025d). Der Nutzen wird durch eine lineare Funktion mit den Variablen der Verkehrsmodi und den Variablen der Personengruppen berechnet. Abhängig von verschiedenen Eigenschaften, wie zum Beispiel der sozioökonomischen Situation oder der Verkehrsmittelverfügbarkeit der verhaltenshomogenen Gruppen, werden die Variablen unterschiedlich gewichtet. Die Gewichtungen werden durch SP-/RP-Befragungen ermittelt (siehe Kapitel 2.2). Generische Variablen stellen die klassischen Eingangsgrößen einer Verkehrsmittelnutzenfunktion dar und werden in *PTV VISUM* in Kenngrößenmatrizen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen aggregiert.

Aufbau des VRS-Nachfragemodells

Das multimodale *PTV VISUM*-Verkehrsnachfragemodell des VRS wurde 2010/2011 für den Prognosehorizont 2025 fortgeschrieben (Schlaich et al., 2012). Das Bestandsmodell für den ÖV bildet den Fahrplanstand 2007/2008 ab. Im Zuge der Fortschreibung wurde ein aktualisiertes ÖV-Angebot integriert. Dieses Angebot beinhaltet unter anderem eine Ausweitung der MEX-Linien nach Fertigstellung von Stuttgart 21. Ferner wurden die Bevölkerungsdaten, Arbeitsplätze, Mobilitätskosten und externe Verkehre und Sonderverkehre (Nachfrage außerhalb des VRS-Gebiets, Messegelände, Flughafen Stuttgart) aktualisiert (Tritschler & Biechele, 2020). Das Prognosemodell umfasst die Region Stuttgart mit den Landkreisen Ludwigsburg, Rems-Murr, Böblingen, Esslingen und Göppingen. Das Netzmodell für den ÖV besteht aus den Verkehrssystemen Regional-, Stadtbus, S-/U-Bahnen, schienengebundener Regional- und Fernverkehr. Die ÖV-Linien sind aufgrund unterschiedlicher Fahrplanlagen und Streckenführungen nicht deckungsgleich mit den Linien der Verspätungsdaten (siehe Kapitel 4.3). So wird zum Beispiel der IRE1 über Stuttgart 21 geführt. Aktuell ist dieser Bahnhof trotz ursprünglicher Planungen nicht fertiggestellt und folglich weicht die Streckenführung von den Verspätungsdaten ab. Weitere nicht realisierte Planungen sind der Fernbahnhof am Stuttgarter Flughafen. Die implementierte Nachfragemodellierung beruht auf den vier Stufen des *VISEM*-Verfahrens. Dafür werden zu erst Kenngrößenmatrizen berechnet und für den Wirtschafts- und öffentlichen Verkehr Zusatzmatrizen eingespielt. Diese Matrizen fließen in die Berechnung der Verkehrsnachfrage und Umlegung ein. Abbildung 4.1 zeigt die 100 Oberbezirksbeziehungen mit der größten ÖV-Verkehrsnachfrage. Die Umlegung und Kenngrößenberechnung der ÖV-Nachfrage erfolgt fahrplanfein und wird für fünf Zeiträume¹ durchgeführt. Durch die Aufteilung in Zeitintervalle lässt sich die im Tagesverlauf variierende ÖV-Nachfrage abbilden (Schlaich et al., 2012). Dieses Verfahren berücksichtigt die ÖV-Linien mit ihren genauen Abfahrts- und Ankunftszeiten und setzt ein ÖV-Angebot mit Liniennetzplan und detailliertem Fahrplan voraus. Die Annahme ist, dass Reisende den Fahrplan der genutzten Verkehrssysteme kennen und ihre Zugangszeit entsprechen wählen. Die Kenngrößenberechnung ermittelt aufgrund der Koordinierung des Fahrplans sehr genaue Ergebnisse (PTV Group, 2025a). Zählraten bilden die Grundlage für die Kalibrierung der aus der ÖV-Umlegung resultierenden Streckenbelastungen und Ein- und Aussteigezahlen. Es liegen Streckenquerschnittszählungen für Bus und Schiene und Zählungen an Haltestellen des Schienenverkehrs vor, welche eine hohe Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Umlegung zeigen. Beim Vergleich der Modellergebnisse der Regionalbahn mit den Zählstellen ergibt sich eine Korrelation von 97 %. Bei der S-Bahn liegt die Korrelation bei fast 100 % und auch die linienfeine Darstellung zeigt für die einzelnen S-Bahnlinien eine

¹ 5:00-6:30 Uhr, 6:30-8:30 Uhr, 8:30-16:00 Uhr, 16:00-18:30 Uhr, 18:30-21:00 Uhr

hohe Korrelation. Für die Stadtbahn in Stuttgart sind die Werte auch sehr gut mit einer Korrelation von 97 %. Weitere Kenngrößen zur Kalibrierung des Modells sind mittlere Fahrweiten und die Umsteigehäufigkeit. In dem VRS-Modell erfolgt die Berechnung der Verkehrsnachfrage aktivitätenketten-basiert in vier Stufen. Die Moduswahl ist die dritte Stufe "und teilt die gesamte Nachfrage [...] auf die einzelnen Verkehrsmodi (zum Beispiel IV, ÖV) anhand modusspezifischer Widerstandskenngrößen (für Reisezeit, Kosten, usw.) auf. Für jeden Modus wird zunächst der Nutzen als Linearkombination der Widerstandskenngrößen berechnet" (PTV Group, 2025b). Die Widerstandskenngrößen des VRS-Modells für den Modus ÖV sind:

- Fahrzeit im Fahrzeug
- Umsteigehäufigkeit
- Zu-/Abgangszeit
- Luftlinienweite
- Wartezeit
- Fahrpreis

Die implementierte Nutzenfunktion hat die Form:

$$(4.1) \quad U_{\text{ÖV}} = \alpha_{\text{Grundnutzen}} * 1 + \beta_{\text{Fahrzeit im Fahrzeug}} \cdot \text{KGM}_{\text{Fahrzeit im Fahrzeug}} \\ + \beta_{\text{Zu-/Abgangszeit}} \cdot \text{KGM}_{\text{Zu-/Abgangszeit}} + \beta_{\text{Wartezeit}} \cdot \text{KGM}_{\text{Wartezeit}} \\ + \beta_{\text{Umsteigehufigkeit}} \cdot \text{KGM}_{\text{Umsteigehufigkeit}} + \beta_{\text{Luftlinienweite}} \cdot \ln(\text{KGM}_{\text{Luftlinienweite}}) \\ + \beta_{\text{Fahrpreis}} \cdot \text{KGM}_{\text{Fahrpreis}}$$

mit

U	Nutzen [<i>Utility</i>]
ÖV	Modus: Öffentlicher Verkehr
α	Konstante des Grundnutzens
β	Gewichtung der Komponenten
KGM	Werte aus ÖV-Kenngrößematrizen [<i>Anzahl, s, meter, EUR</i>]
$\ln$	natürlicher Logarithmus

Diese Faktoren senken den Nutzen, da sie in der Bewertung der Verkehrsmittel negativ wirken. Folglich sind die Parameter β negativ. Zu Beachten ist, dass die Gesamt-reisezeit sich aus mehreren Komponenten zusammensetzt: Fahrzeit im Fahrzeug, Zu-/Abgangszeiten und Wartezeit. Eine Bewertung der Gesamtreisezeit und eine Gewichtung dieser Nutzenkomponente ist im VRS nicht durchgeführt worden.

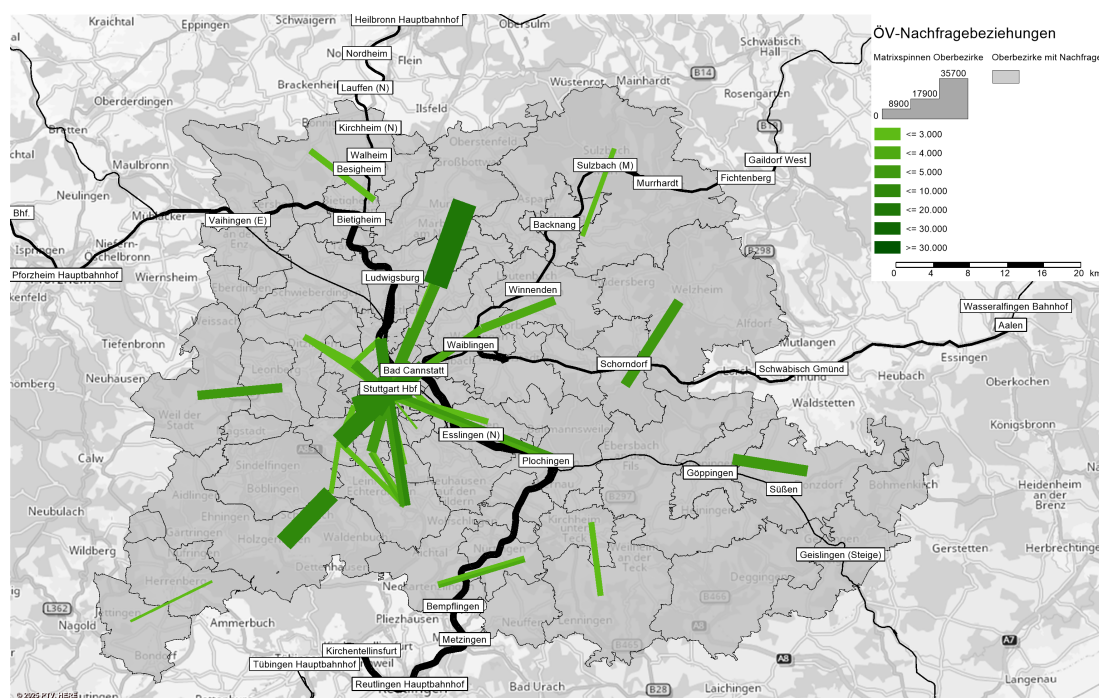


Abbildung 4.1: Die 100 Oberbezirksbeziehungen mit größter ÖV-Nachfrage

4.2 Parameterschätzungen zur Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit

Klinkhardt et al. (2025) haben die Auswirkungen verschiedener Faktoren auf die Verkehrsmittelwahl durch SP-Befragungen untersucht und zwei Verkehrsmittelwahlmodelle entwickelt. Diese Modelle zeichnen sich durch eine differenzierte Betrachtung der Reisezeit und dessen Varianz für die Modi Pkw und ÖV aus. So wird eine Minute Reisezeit im Auto von den Teilnehmenden der Befragung negativer bewertet als eine Minute Reisezeit in öffentlichen Verkehrsmitteln. Die Reisezeitabweichungen werden für den ÖV durch die mittlere Verspätung, für das Auto durch die Standardabweichung der Verspätungen quantifiziert. Da diese Werte nur bedingt mit einander vergleichbar sind, wird stattdessen das *Reliability Ratio* verwendet. Dieses Verhältnis gibt Auskunft darüber wie Reisende die Reisezeitzuverlässigkeit im Verhältnis zur Reisezeit bewerten. Dieses Verhältnis wird auch für die in Kapitel 3.2 beschriebenen Austauschverhältnisse verwendet. In der Studie von Klinkhardt et al. (2025) wird die mittlere Verspätung von öffentlichen Verkehrsmitteln 3,7 mal negativer als die Reisezeit bewertet. Für das Auto gilt hier ein Verhältnis von 1,1. Im Gegensatz dazu wird das Verhältnis der Bewertung von Verspätungen zur Reisezeit für den öffentlichen Verkehr in anderen Untersuchungen geringer angesetzt. So weist die Standardisierte Bewertung in der Version 2016+ für die Bewertung von Abweichungen der Istfahrzeiten von dem Sollfahrplan ein Verhältnis von 2,7 auf (Intraplan Consult GmbH & Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH,

2023). In Studien zur Ermittlung von Bewertungsansätzen für die Reisezeit und dessen Zuverlässigkeit für den BVWP sind RR für den ÖV von 0,9–1,0 berechnet worden (Axhausen et al., 2014; Dubernet & Axhausen, 2020). Die Schätzung der Parameter ist von einer Vielzahl an Faktoren abhängig. Die Erhebungen für die Ermittlung der Parameter unterscheiden hinsichtlich der Methodik, der als relevant erachteten Attribute und des Designs der Befragungen.

4.3 Verspätungsdaten

Die verwendeten Verspätungsdaten basieren auf der Datengrundlage von Schubert (n. d.) und enthalten Fahrplandaten und Statistiken für den Regionalzugverkehr in Deutschland für die Fahrplanperiode vom 10.12.2013 bis 31.07.2024. Die Fahrplandaten sind den Zugnummer (*zugnr*) aus Kursbüchern zugeordnet und setzen sich aus einer Gattungsbezeichnung und einer fünfstelligen Nummer zusammen (DB Fernverkehr AG, n. d.). Eine eindeutige Verknüpfung mit den Liniennummern (IRE1, MEX12 etc.) ist nicht ohne zusätzliche Daten möglich. In dem Datensatz werden für die Fahrplanfahrten das Datum (*datum*), die planmäßige Ankunfts- (*arrTime*) und Abfahrtszeit (*depTime*) und die Ankunfts- (*adelay*) und Abfahrtsverspätung (*ddelay*) für die angefahrenen Bahnhöfen (*bhf*) aufgelistet. Alle Bahnhöfe, die während einer Fahrt angefahren werden, haben eine Ankunfts- und Abfahrtszeit in der Form: "s/mm/ssmm". Die erste oder die ersten zwei Ziffern enthalten die Stunde ("s/ss") und die letzten zwei Ziffern die Minuten ("mm"). "1451" bedeutet folglich 14:51 Uhr und "224" 2:24 Uhr. Der Beginn einer Fahrplanfahrt wird durch die Ankunftszeit = "9999" und das Ende einer Fahrt durch Abfahrtszeit = "9999" markiert. Weitere Hinweise zum Beginn einer neuen Fahrplanfahrt oder dem Wechsel der gefahrenen Linienroute sind nicht gegeben. Dies stellt vor allem die Berechnung von Verspätungskennwerten und die Verknüpfung mit den ÖV-Angebotsdaten vor Herausforderungen. Kapitel 6.1 und 6.5 erläutert diese Herausforderungen und die gewählten Lösungen. Für diese Masterarbeit ist der Datensatz auf Regionalverkehre reduziert worden, die in Stuttgart halten. Dadurch konnte der Datensatz von 29.320.259 Haltestellenabschnitte auf 1.048.575 verringert werden.

4.4 Angebotsdaten

Es bedarf aktueller ÖV-Linien mit Verspätungsdaten für die angepasste Verkehrsmittelwahl. Da die VRS-Angebotsdaten aufgrund unterschiedlicher Streckenführungen nicht verwendet werden können, sind alternative Daten zu nutzen. Dafür bietet sich der GTFS-Soll-Fahrplandatenatz von Baden-Württemberg mit dem gesamten Bus- und

Schiennenverkehr an. Dieser wird von der *NVBW*¹ Open Data zur Verfügung gestellt (NVBW Open Data, 2025). GTFS²-Daten basieren auf einem "digitale[n] Austauschformat für Fahrpläne des öffentlichen Personenverkehrs" (Wikipedia Foundation, Inc., n. d.). Das Datenformat stellt Fahrplaninformationen von Verkehrsbetrieben Kartendienstern wie Google Maps oder ÖV-Informationsanwendungen zur Verfügung und stellt den Standard für ÖPNV-Fahrplandaten dar. Der Vorteil liegt in der einfachen Datenstruktur. Die GTFS-Daten der NVBW bestehen aus zehn *.txt*-Dateien, welche die Fahrpläne vom 30.04 bis 26.07.2024 enthalten. Die Dateien fassen Informationen über die einzelnen Verkehrsbetriebe, Haltestellen, Fahrpläne, Linienrouten, Fahrplanfahrten auf diesen Linienrouten und Fahrzeiten zusammen. Eine Kalenderdatei stellt tägliche und saisonale Abweichungen dar. Zusätzliche Textdateien, die fakultativ verwendet werden können, enthalten Informationen zum genauen Routing der Linienrouten (streckennahe Verortung) (*shapes.txt*), Information über die Datenbereitstellung (*feed_info.txt*), Tarifgestaltung (Fahrpreise und Preiszonen) (*fare_rules.txt*), Umsteigemöglichkeiten (*transfers.txt*), Taktverkehre (*frequencies.txt*) und Übersetzungen (*translations.txt*) (Google Ireland Limited, 2024). Die Tabelle A.2 im Anhang zeigt die Informationen der einzelnen Dateien, die von der NVBW zur Verfügung gestellt werden. GTFS-Textdateien können über Datenschnittstellen in GIS³ wie das Open-Source-Programm *QGIS* oder das kommerzielle Programm *ArcGIS Pro* geladen werden. Diese Programme wandeln die Textdateien in Shape-Dateien um und hinterlegen die Fahrplandaten und Haltestelleninformationen in Attributtabelle. Die Abbildung 4.2 zeigt die streckennahe Verortung der GTFS-Linienroutendaten für das Stadtgebiet Karlsruhe in *ArcGIS Pro*. In *PTV VISUM* können GTFS-Daten über die Funktion *Import von GTFS* in die VISUM-Angebotsstruktur geladen werden. In den Einstellungen für den GTFS-Datenimport ist die zu importierende Fahrplanperiode zu bestimmen. Zur Auswahl stehen der Jahreskalender, mit allen Fahrplanfahrten eines Jahres, der Wochenkalender oder kein Kalender. Bei der letzten Option wird ein spezifischer Tag ausgewählt, für den der Tagesfahrplan übernommen wird. Hierbei gilt zu beachten, dass der Tag so gewählt werden sollte, dass ein werktägliches Angebot importiert wird. Ein Sonntag in den Schulferien hat ein geringeres Angebot als ein Werktag zur Schulzeit. In der Praxis werden hier häufig ein Dienstag oder Donnerstag ausgewählt.

Dieses Kapitel hat alle relevanten Daten und deren Spezifika sowie Ausprägungen beschrieben. Im nächsten Kapitel 5 wird die Methodik und die sich daraus ergebenden Schritte zur Integration der Reisezeitzuverlässigkeit in die Verkehrsmittelwahl beschrieben.

¹Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg

²General Transit Feed Specification

³Geoinformationssysteme

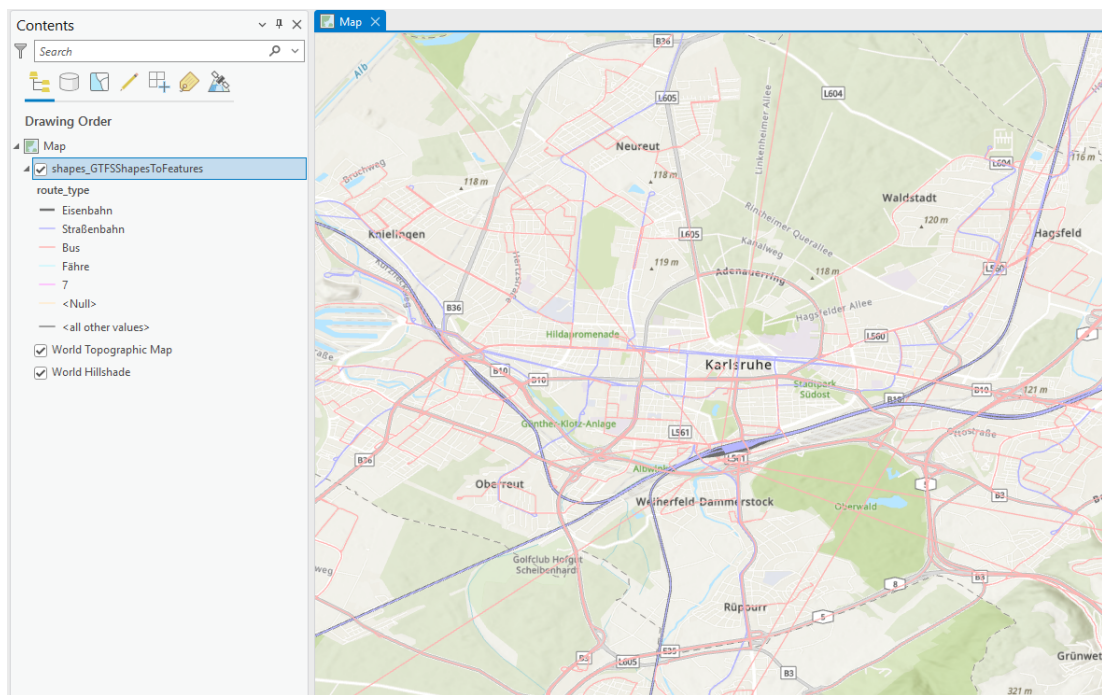


Abbildung 4.2: Streckennahe Verortung von GTFS-Linienrouten in Karlsruhe

5 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt das Forschungsdesign sowie die Vorgehensweise zur Aufbereitung, Auswertung und Integration der Verspätungsdaten in das Verkehrsmodell. Zuerst werden die relevanten Verspätungskennwerte berechnet, dann mit den GTFS-Angebotsdaten verknüpft und anschließend in das VRS-Nachfragemodell integriert.

5.1 Beschreibung des Forschungsdesigns

Die Abbildung 5.1 zeigt die Komplexität des Forschungsdesigns und die harmonisierten und verknüpften Datensätze. Für das bestehende VRS-Modell sollten externe Verspätungsdaten ausgewertet werden. Diese sind jedoch nicht deckungsgleich mit den bestehenden ÖV-Linien des VRS-Modells. Daher war ein Zwischenschritt notwendig, bei dem zusätzliche Angebotslinien mit den Verspätungsdaten verknüpft wurden. Durch den anschließenden Import dieser Linien konnte das Bestandsangebot im vorliegenden VRS-Modell erweitert werden. Die hinzugefügten Angebotslinien stellen ein Bindeglied zwischen den Verspätungsdaten und dem VRS-Modell dar und verknüpfen die Nachfrage und das ÖV-Angebot. Die Methodik gliedert sich in vier Arbeitspakete:

1. Arbeitspaket 1: Transformation und Berechnung der Verspätungskennndaten
2. Arbeitspaket 2: Verknüpfung der Angebotsdaten mit den Verspätungskennndaten
3. Arbeitspaket 3: Import der Angebotsdaten in das Zielnachfragemodell
4. Arbeitspaket 4: Modellierung der Verkehrsmittelwahl unter Berücksichtigung von Verspätungen

Abbildung 5.2 stellt den gesamten Prozess der Arbeitspakete und die Vielzahl an Datentransformationsprozessen und relevanten Verknüpfungspunkte dar.

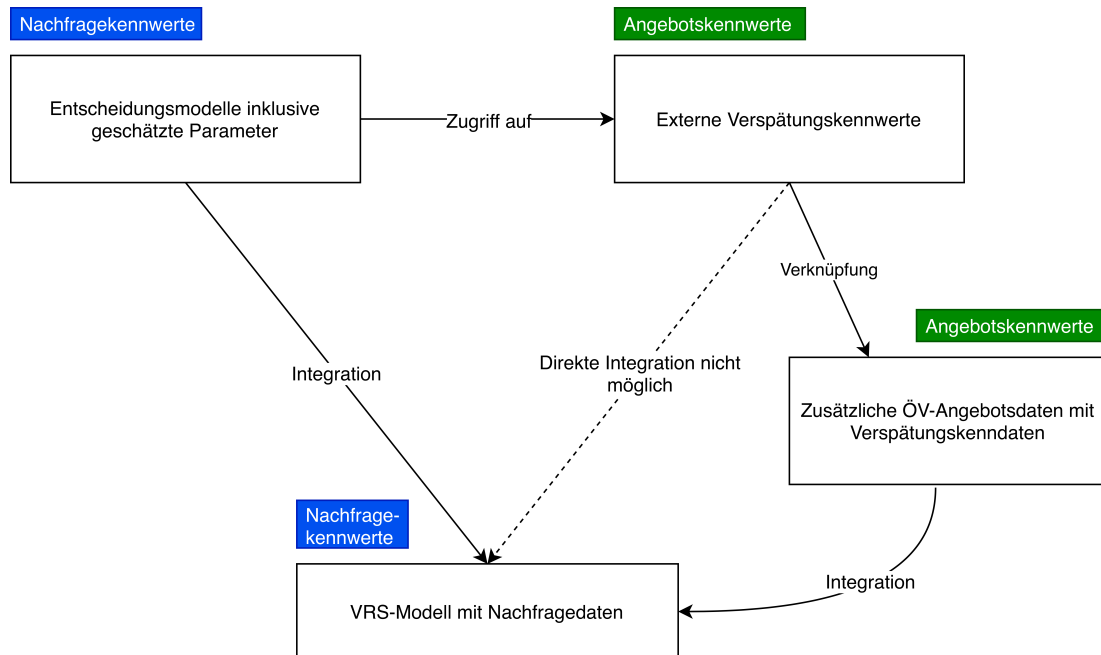


Abbildung 5.1: Ablauf der Verknüpfung und Bearbeitung der Datensätze

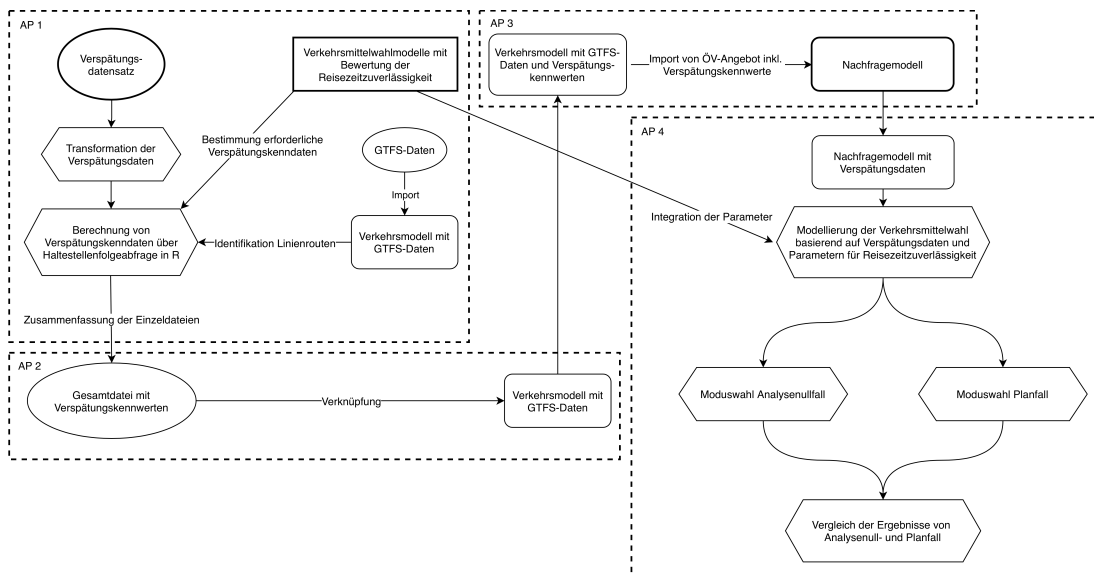


Abbildung 5.2: Darstellung der Arbeitspakete für Integration zur Reisezeitzuverlässigkeit in das Verkehrsmodell

5.2 Transformation und Berechnung der Verspätungskennndaten

Die Verspätungskennndaten können nicht für die ÖV-Angebotsdaten im Nachfragemodell berechnet werden, da diese sich hinsichtlich der Streckenführung und der Fahrplanlagen unterscheiden. Stattdessen werden die in Kapitel 4.4 beschriebenen GTFS-Daten als Angebotsdaten genutzt. Für diese Daten wurden die Verspätungskennndaten berechnet. Die zu berechnenden Verspätungskennwerte (Mittlere Verspätung und Standardabweichung) ergeben sich aus den beiden Nutzenfunktionen (Formeln (3.1), 3.2) von Klinkhardt et al. (2025). Die Verspätungskennwerte wurden für jede Linienroute differenziert nach Richtung, Haltestelle und aggregierten Stundenblock berechnet. Der erste Iterationsschritt bestimmte diese Werte für die Ankunftsverspätung und der zweite für die Abfahrtsverspätungen. Bei der Durchsicht der Daten ist aufgefallen, dass die Berechnung der Verspätungskennndaten für die Liniennummern des GTFS-Datensatzes nicht ohne weiteres möglich ist. Die Liniennummern entsprechen nicht den Zugnummern des Verspätungsdatensatzes, folglich ist eine Zuordnung dieser Liniennummern zu den Zugnummern erforderlich. Dies erfordert einen Zwischenschritt, der in Kapitel 6.1 erläutert wird. Die Ergebnisse der berechneten Verspätungskennwerte behandelt Kapitel 6.2. Im Anhang A.1 sind alle ausgewerteten Linienrouten je Liniennummer dargestellt. Die Verknüpfung der ausgewerteten Verspätungsdaten mit den ÖV-Angebotsdaten ist Gegenstand des nächsten Kapitels 5.3.

5.3 Verknüpfung der Angebotsdaten mit den Verspätungskennndaten

Die Angebotsdaten sind GTFS-Daten von Regionalzügen, die am einem spezifischen Stichtag (04.06.2024) in Stuttgart Hbf halten. Der Stichtag ist ein Dienstag während der Schulzeit und liegt innerhalb derselben Fahrplanperiode wie die Verspätungsdaten und wurde bei dem Import der GTFS-Fahrplandaten in *PTV VISUM* festgelegt. Mit diesen

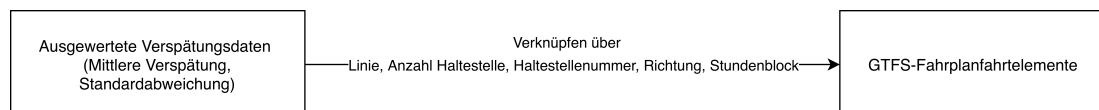


Abbildung 5.3: Verknüpfung der Verspätungsdaten mit den GTFS-Daten

GTFS-Daten sind die in Kapitel 5.2 berechneten Verspätungskennwerte zu verknüpfen (siehe Abbildung 5.3). Die GTFS-Daten wurden als Tabelle mit Fahrplanfahrt-Verläufen exportiert und mit den Verspätungskennndaten verknüpft. Die Tabelle 5.1 nennt die Verknüpfungsbedingungen und deren Verfügbarkeit in den beiden Datensätzen. Während

der Bearbeitung ist ersichtlich geworden, dass ein Teil der notwendigen Verknüpfungsbedingungen noch nicht vorlag. Diese wurden durch zusätzliche Transformationsprozesse hergestellt, die in Kapitel 6.3 beschrieben werden.

Verknüpfungsbedingungen	Verfügbarkeit
Liniennummer	GTFS-Daten: im Ursprungsdatensatz vorhanden Verspätungsdatensatz: Zuordnung durch Haltestellenfolgeabfrage in <i>R</i>
Haltestellenbezeichnung	GTFS-Daten: Nutzung der Haltestellennummer aus <i>PTV VISUM</i> Verspätungsdatensatz: Zuordnung der GTFS-Haltestellennummer aus <i>PTV VISUM</i>
Richtung	GTFS-Daten: Nutzung der Richtungsnummer aus <i>PTV VISUM</i> Verspätungsdatensatz: Zuordnung durch Haltestellenfolgeabfrage in <i>R</i>
Aggregierter Stundenblock	GTFS-Daten: Implementierung über ein <i>PTV VISUM</i> Formelattribut Verspätungsdatensatz: Zuordnung in <i>R</i>
Anzahl Haltestellen	GTFS-Daten: Nutzung der Anzahl der Haltestellen aus <i>PTV VISUM</i> Verspätungsdatensatz: Zuordnung durch Haltestellenfolgeabfrage in <i>R</i>

Tabelle 5.1: Darstellung der Verknüpfungsbedingungen der Datensätzen

Anschließend erfolgte die Reintegration der GTFS-Fahrplanfahrt-Verläufe inklusive Verspätungsdaten in das Verkehrsmodell. Der Import der Verspätungskennwerte basiert dabei auf benutzerdefinierten Attributen (*Mittlere Verspätung*, *Standardabweichung*). Der anschließende Export dieser Fahrplanfahrt-Verlaufsdaten in das VRS-Modell dient der Verbindung des Angebots und dessen Verspätungskennwerten mit der Nachfrage, um die Effekte einer veränderten Verkehrsmittelwahl in Abhängigkeit von der Reisezeit-zuverlässigkeit abzubilden. Kapitel 5.4 erläutert hierzu das Vorgehen.

5.4 Import der Angebotsdaten in das Nachfragemodell

Die Abbildung 5.4 zeigt schematisch den nächsten Schritt des Imports der Angebotsdaten mit Verspätungskennwerten in das VRS-Nachfragemodell. Dies erfolgt über die *PTV VISUM*-Funktion *Import von ÖV-Angebot*. Die importierten Linien sollen das bestehende Haltestellennetz verwenden, um eine Verknüpfung mit der Nachfrage sicherzustellen. Die Durchsicht der Daten zeigte jedoch, dass die Namen der GTFS-Haltestellen von den Haltestellennamen des VRS-Modells abweichen und eine direkte Verknüpfung verhinderten. Deshalb war ein weiterer Datenbearbeitungsschritt notwendig, der in Kapitel 6.4 beschrieben wird. Nach dem erfolgreichen Import wurde das Netzmodell über die *PTV VISUM*-Funktion: *Netz prüfen* hinsichtlich Fehler geprüft. Fehlerquellen sind Bezirke ohne Anbindung an das ÖV-Netz, Strecken ohne hinterlegte Fahrzeiten und Haltestellen ohne Anbindung an einen Bezirk. Daraufhin wurden für relevante Bezirke ohne Anbindung eine gesetzt, für alle Strecken Fahrzeiten berechnet und alle Haltestellen an einen Bezirk angebunden, um an diesen Haltestellen das Ein- und Aussteigen zu ermöglichen. Nach dem Import der ÖV-Angebotsdaten und der Netzüberprüfung ist das VRS-Modell mit allen ÖV-Angebotsdaten so aufbereitet, dass ein Verkehrsmittelwahlmodell unter Berücksichtigung der Reisezeitzuverlässigkeit gerechnet werden kann. Abbildung 5.5 zeigt die importierten Regionalzuglinien im VRS-Modell.

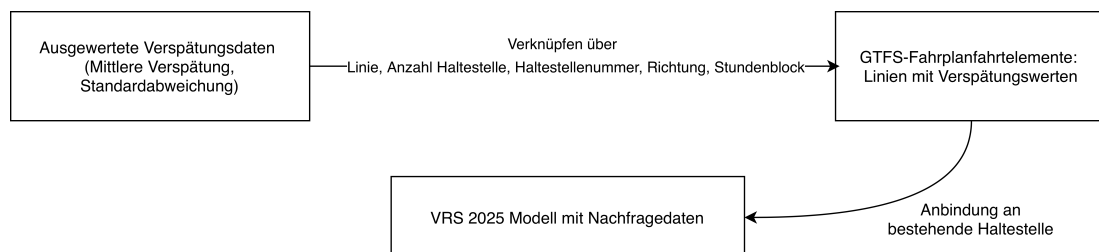


Abbildung 5.4: Integration der GTFS-Fahrplandaten mit Verspätungswerten in das Nachfragemodell

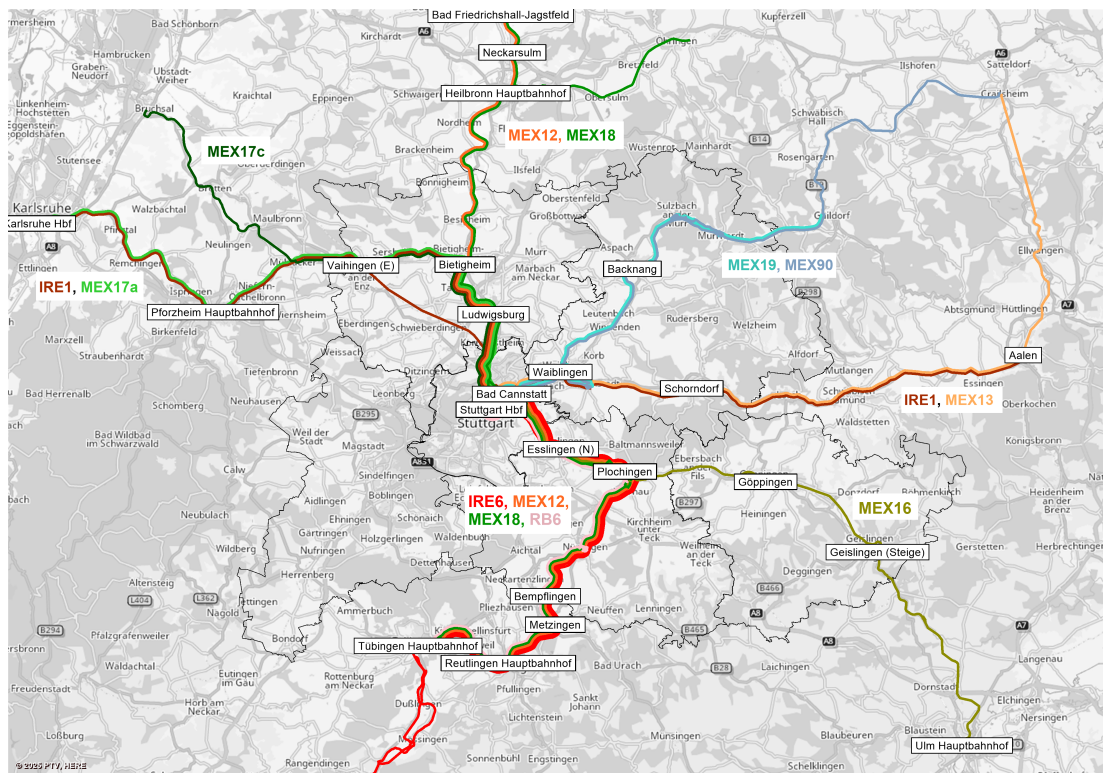


Abbildung 5.5: Importierte ÖV-Linien im VRS-Netzmodell

5.5 Verkehrsmittelwahlmodellierung

Die Modellierung der Verkehrsmittelwahl erfolgt für drei Planfälle, die sich durch unterschiedliche Sensitivitäten in der Bewertung der Reisezeitvarianz auszeichnen. Abbildung 5.6 zeigt den Ablauf der Modellierung. Zuerst wurden ÖV-Kenngrößen berechnet, die in eine aktualisierte Nutzendefinition mit zusätzlichen Parametern zur Berücksichtigung von Verspätungen einfließen. Anschließend wird die Moduswahl mit dem VISEM-Verfahren für die Analysenull- und Planfälle berechnet.

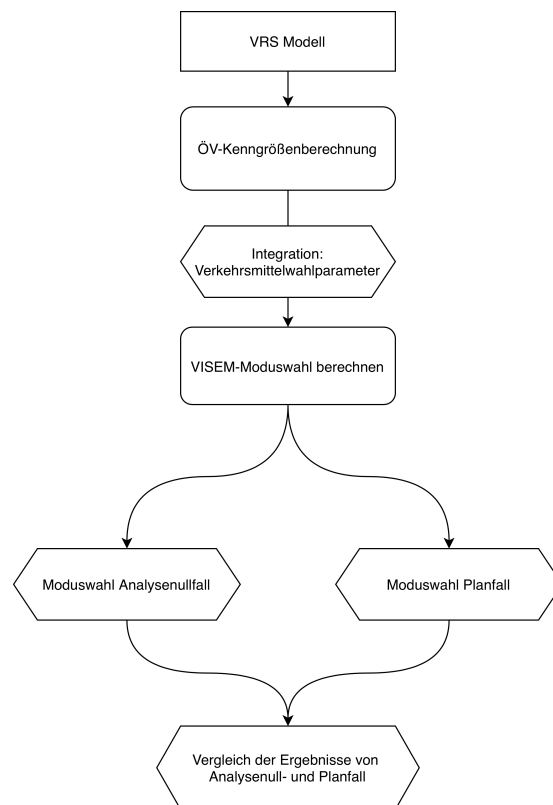


Abbildung 5.6: Ablauf der Verkehrsmittelwahlmodellierung unter Berücksichtigung der Reisezeitzuverlässigkeit

Die Kenngrößen sind nach Zielaktivitäten, Personengruppen und Modi differenziert und werden durch den Verfahrensschritt *IV-/ÖV-Kenngrößenmatrizen berechnen* für verschiedene Maßstabsebenen (Oberbezirks-, Bezirks-, Haltestellenbereichsmatrizen) ermittelt. Die Berechnung der zusätzlichen ÖV-Kenngrößenmatrix dient der Abbildung der mittleren Verspätung von Bezirksbeziehungen und wird mit einem von Klinkhardt et al. (2025) geschätzten Parameter bewertet. Während des Forschungsablaufs hat sich gezeigt, dass mehrere Möglichkeiten existieren mit welchen diese Kenngröße berechnet werden können. Kapitel 6.5 zeigt die Implikationen der zwei Berechnungsweisen.

Berechnung der Verkehrsmittelwahl mit Basis-, Analyse- und Planfällen

Das Modell berücksichtigt implizit die realen Verspätungen, da für das Modell die Nachfrage mithilfe von Zähldaten kalibriert wurde. Die Zähldaten sind Fahrgastzahlen, die an bestimmten Punkten im Netz erhoben wurden. Diese Fahrgäste haben den ÖV trotz der real auftretenden Verspätungen genutzt. Da in dem VRS-Modell jedoch keine Verspätungen hinterlegt sind, besteht hier bezüglich der Wirkung von Verspätungen eine Leerstelle. Um diese Leerstelle zu beheben, wurde ein Analysenullfall erstellt. Die Anzahl an Personen, die den ÖV nutzen, ist zwischen dem Analysenullfall und

dem Basisfall gleich. Der Unterschied besteht in der Berücksichtigung der Verspätungen. Diese werden im Analysenullfall durch zusätzliche Parameter für die mittlere Verspätung und der Kenngrößen für die mittlere Verspätung abgebildet und mit einem positiven Faktor ausgeglichen. Nur die Betrachtung der Verspätungen würde zu einer zu niedrigen Nachfrage führen. Der positive Faktor zum Ausgleich der Verspätungswirkungen wurde durch zwei unterschiedliche Verfahren gebildet. Das erste Verfahren ist die pauschale Anhebung des Grundnutzens, das zweite Verfahren reduziert den Faktor für die Reisezeit. Kapitel 6.5 erläutert diese Verfahren. Der Planfall ist die Berechnung der Verkehrsmittelwahl mit der angepassten Verkehrsmittelwahlfunktion und ohne Verspätungswerte. Der Analysenullfall wird mit dem Planfall verglichen, um die Wirkung der Verspätungen auf die Nachfrage abzubilden und zu quantifizieren. Dabei wird die Differenz aus dem Analysenullfall und dem Planfall gebildet und die dadurch ermittelten Fahrgastgewinne sind auf den positiven Ausgleichsfaktor zurückzuführen. Dieser stellt die Effekte pünktlicher ÖV-Linien dar. Die folgende Liste zeigt das beschriebene Vorgehen:

1. Berechnung Basisfall: Verkehrsmittelwahl ohne Verspätungen
2. Berechnung Analysenullfall: Verkehrsmittelwahl mit Verspätungen + Ausgleich durch positiven Faktor: Anhebung Grundnutzen oder Verringerung des Parameters für die Fahrzeit im Fahrzeug
3. Berechnung Planfall: Verkehrsmittelwahl ohne Verspätungen + Ausgleich durch positiven Faktor: Anhebung Grundnutzen oder Verringerung des Parameters für die Fahrzeit im Fahrzeug
4. Berechnung Delta aus Planfall und Analysenullfall

Die Basis-, Analysenull- und Planfälle repräsentieren unterschiedliche Szenarien mit abweichender Sensitivität bei der Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit. Diese wird durch das Verhältnis des Parameters der Reisezeitvarianz zum Parameter der Reisezeit (RR) dargestellt. Fall 1 verwendet einen RR -Wert von 3,7 (Klinkhardt et al., 2025), Fall 2; 2,7 (Standardisierte Bewertung Version 2016+) und Fall 3; 1,0 (BVWP-Bewertungsansätze).

$$(5.1) \quad RR = \frac{\text{Parameter der Varianz der Reisezeit}}{\text{Parameter Reisezeit}}$$

Die Effekte einer verbesserten Reisezeitzuverlässigkeit und die dadurch induzierten Fahrgastgewinne werden in Kapitel 6.6 dargestellt.

6 Ergebnisse

Dieses Kapitel bündelt die aus der Anwendung der Methodik gewonnenen Erkenntnisse und analysiert die Wirkungen verbesserter Zuverlässigkeit für die drei Planfälle.

6.1 Anpassung der Berechnung der Verspätungskenndaten

Hinsichtlich der Berechnung von Verspätungskenndaten besteht die Schwierigkeit, dass die GTFS-Liniennummern nicht mit den Zugnummern des Verspätungsdatensatzes übereinstimmen und deshalb für diese Liniennummern keine Verspätungsdaten berechnet werden können. Dieses Kapitel erläutert dafür einen Lösungsansatz, indem die Verspätungskenndaten für eine Haltestellenfolge der GTFS-Liniennummern berechnet wurden.

Die Zugnummern des Verspätungsdatensatzes entsprechen den Kursbüchern der Verkehrsbetriebe und die Liniennummern des GTFS-Datensatzes den Nummern der Fahrgastinformation (IRE1, MEX12 etc.). Die Verknüpfung der beiden Nummern ist über die Kursbücher möglich, aber mit erheblichem Aufwand verbunden. Abbildung 6.1

km	Zug	RE 7 1907 Sa, So	MEX 12 19257	RE 10a 19351	RB 18 19357	MEX 12 19357	MEX 18 19357	RB 8 19351	MEX 12 19357
von	Karlsruhe Hbf								
	Namheim Hbf								
Würzburg Hbf									
Würzburg Süd									
Reichenberg (Unterfr)									
Geroldshausen									
Kirchheim (Unterfr)									
Gaibühlzellbrunn									
Wittighausen									
Zimmer (Main-Tauber)									
Günzfeld									
Geroltsheim									
Lands									
Bonberg-Wölchingen									
Eubigheim									
Rosenberg (Baden)									
Osterburken									
Osterburken									
82 Adelsheim Ost									
85 Sennfeld									
89 Reigheim									
94 Möckmühl									
Möckmühl									
99 Zürlingen									
101 Sigmaringen									
105 Neudenau									
106 Herbolzheim (Jagst)									
111 Untergriesheim									
116 Bad Friedrichshall Hbf									
Bad Friedrichshall Hbf 665.1, 706, 710.41									
120 Neckarsulm Nord									
122 Neckarsulm									
Neckarsulm									
126 Heilbronn Salmter									
127 Heilbronn Hbf									
Heilbronn Hbf									
134 Nordheim (Württ)									
140 Lauffen (Neckar)									
145 Kirchheim (Neckar)									
148 Walheim (Württ)									
150 Bietigheim									
157 Bietigheim-Bissingen									
Bietigheim-Bissingen									
166 Ludwigsburg									
180 Stuttgart Hbf									

Abbildung 6.1: Ausschnitt aus einem Kursbuch der Deutschen Bahn

zeigt, dass den beiden Liniennummern MEX12 und MEX18 Zugnummern zugeordnet

sind, die sich stark ähneln. Der Verspätungsdatensatz enthält jeweils die Zugnummern: "MEX19201", "MEX19203" und "MEX19205". Um eine korrekte und einfachere Methode zu wählen, damit die relevanten Züge ausgewertet werden können, wurde statt der Zugnummer, die Haltestellenfolge der einzelnen Linienrouten der Züge (z. B. Heilbronn Hbf, Nordheim (Württ), Lauffen (Neckar), Kirchheim (Neckar), Walheim (Württ), Besigheim Bietigheim-Bissingen, Ludwigsburg, Stuttgart Hbf) abgefragt und zur Berechnung der Verspätungskennwerte genutzt. Dieses Verfahren bietet vier Vorteile:

1. Die Berechnung der Verspätungen je Haltestellenabschnitt erfolgt aggregiert über alle Linien, die die Haltestellenfolge befahren. Sie werden nicht für die einzelnen Linien isoliert berechnet.
2. ÖV-Linien weisen üblicherweise Fahrplanfahrtverläufe mit unterschiedlichen Haltestellenfolgen auf. So gibt es beispielsweise bei dem IRE1 Fahrplanfahrtverläufe, die bis Stuttgart Hauptbahnhof oder bis Aalen Hauptbahnhof fahren. Diese unterschiedlichen Linienrouten können durch das Verfahren einzeln ausgewertet werden.
3. Temporäre Anpassungen aufgrund von Baustellen können durch eine abweichende Haltestellenfolge abgebildet werden. Für diese abweichende Linienroute werden Verspätungskennwerte berechnet.
4. Die Verspätungskennwerte werden richtungsspezifisch berechnet, da sich die Verspätungswerte abhängig von der Befahrungsrichtung unterscheiden.

Die GTFS-Daten dienen zur Identifikation der Haltestellenfolgen je Liniennummer. Abbildung 6.2 zeigt das Vorgehen der Identifikation der einzelnen Haltestellenfolgen und die anschließende Berechnung der Verspätungskennwerte. Die Haltestellenfolge der Liniennummern wurden aus dem tabellarischen Fahrplan aus *PTV VISUM* kopiert und mithilfe der *Programmiersprache R* in der Entwicklungsumgebung *R Studio* in einen Textvektor umgewandelt. Die *R*-Abfrage mit dem Textvektor identifizierte die Haltestellenfolge in den Verspätungsdaten und für diese Linienroute erfolgte nun die Transformation und Berechnung der Verspätungskennwerte. Der Textvektor hat das folgende Format:


```

1   ziel_bhf <- c(
    "Heilbronn Hbf",
    "Nordheim (Wuertt)",
    "Lauffen (Neckar)",
    "Kirchheim (Neckar)",
6   "Walheim (Wuertt)",
    "Besigheim Bietigheim-Bissingen",
    "Ludwigsburg",
    "Stuttgart Hbf"
  )

```

Für die identifizierte Haltestellenfolge in den Verspätungsdaten wurden die Abfahrtszeiten in vier Stundenblöcke aggregiert, um die Verspätungskennwerte gebündelt zu berechnen:

1. Stundenblock (*Time_aggr*) 1: 8:00 bis 12:00 Uhr
2. Stundenblock (*Time_aggr*) 2: 12:01 bis 16:00 Uhr
3. Stundenblock (*Time_aggr*) 3: 16:01 bis 20:00 Uhr
4. Stundenblock (*Time_aggr*) 4: 20:01 bis 7:59 Uhr

Die Berechnung der Verspätungskennwerte erfolgte für die Linienrouten differenziert nach Richtung, Haltestelle und aggregierten Stundenblock. Anschließend wurde der Haltestellenfolge die Liniennummer der GTFS-Daten zugeordnet, um die spätere Verknüpfung zu ermöglichen. Haltestellenfolgen der Linien IRE1, IRE6, RB6, RB14a, MEX12, MEX13, MEX16, MEX17a, MEX17c, MEX18, MEX19, MEX90, RE90 aus dem GTFS-Datensatz konnten in den Verspätungsdaten identifiziert werden. Für diese Linien wurden insgesamt 1.048.497 Haltestellenabschnitte mit jeweils zwei Verspätungskenndaten berechnet.

Das beschriebene Verfahren ist aufgrund abweichender Linienbezeichnungen der beiden Datensätzen notwendig und bietet folgende Vorteile: Die Verspätungen je Haltestellenabschnitt werden aggregiert über alle bedienenden Linien ermittelt und richtungsspezifisch ausgewiesen. Da Linien oft variierende Fahrplanfahrtverläufe (Haltestellenfolgen) besitzen, werden abweichende Linienroute, inklusive temporärer Umleitungen infolge von Baustellen, als eigene Sequenz separat ausgewertet und mit eigenen Verspätungskennwerten belegt. Die Ergebnisse der berechneten Verspätungskennwerte für die ausgewerteten Linien zeigt das folgende Kapitel 6.2.

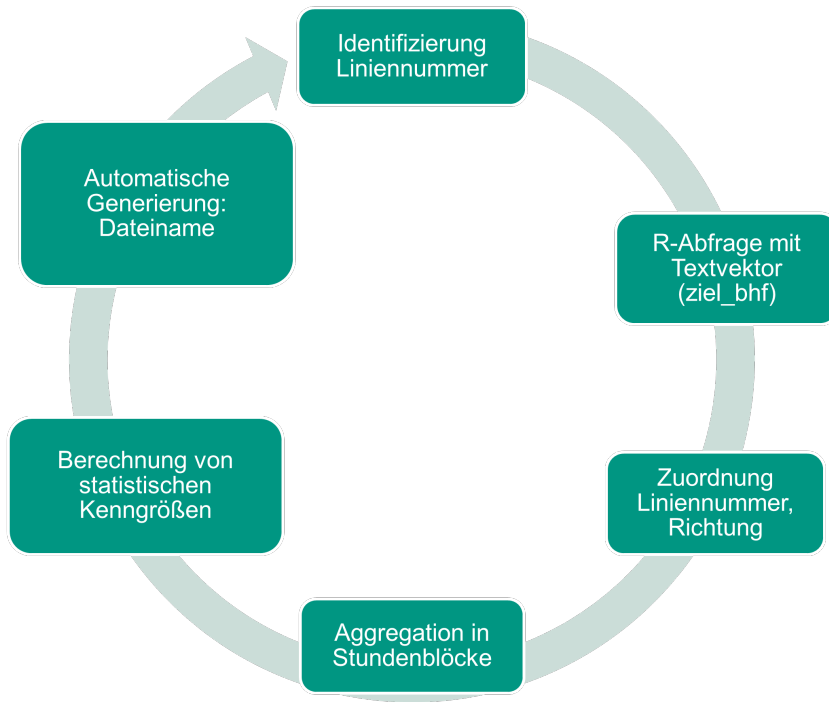


Abbildung 6.2: Verfahrensablauf der Berechnung von Verspätungskennwerten über die Haltestellenfolge

6.2 Ergebnisse der Linienverspätungen

Das Balkendiagramm (Abbildung 6.3) zeigt für die 13 Linien die berechneten Verspätungskennwerte der Ankunftsverspätung: die mittlere Verspätung und die Standardabweichung (Streumaß). Die Verspätungskennwerte sind über alle Linienrouten und die Richtung zusammengefasst. MEX17 weist mit 1,35 Minuten die geringste mittlere Verspätung auf, RB6 mit 4,69 Minuten die Höchste. Der linienübergreifende Mittelwert beträgt 2,25 Minuten. Die Standardabweichungen liegen zwischen 2,58 und 6,74 Minuten und im Mittel beträgt sie 5,29 Minuten. Dies verdeutlicht die Spannweite der Verspätungen über die Linien hinweg. Interessanterweise zeigen einige Linien Diskrepanzen zwischen der mittleren Verspätung und der Streuung dieser Verspätungswerte. Der MEX16 weist geringe Verspätungswerte auf (2,01 Minuten), jedoch streuen diese sehr stark (Standardabweichung 6,75 Minuten). Der RB6 weist die höchste mittlere Verspätung von 4,69 Minuten und die zweithöchste Standardabweichung (6,45 Minuten) auf. Der MEX17c hingegen hat sowohl die geringste mittlere Verspätung je Haltestelle (1,35 Minuten) als auch die geringste Standardabweichung mit 2,58 Minuten. Die genauere Betrachtung der Verteilung der Ankunftsverspätung des MEX16 je Haltestelle zeigt, dass die hohe Streuung auf den Abschnitt Ulm Hbf–Amstetten zurückzuführen ist (siehe Abbildung 6.4). Die Standardabweichung der Ankunftsverspätung liegt in diesem Abschnitt für die sechs Haltestellen bei über 14 Minuten. Die hohe Streuung

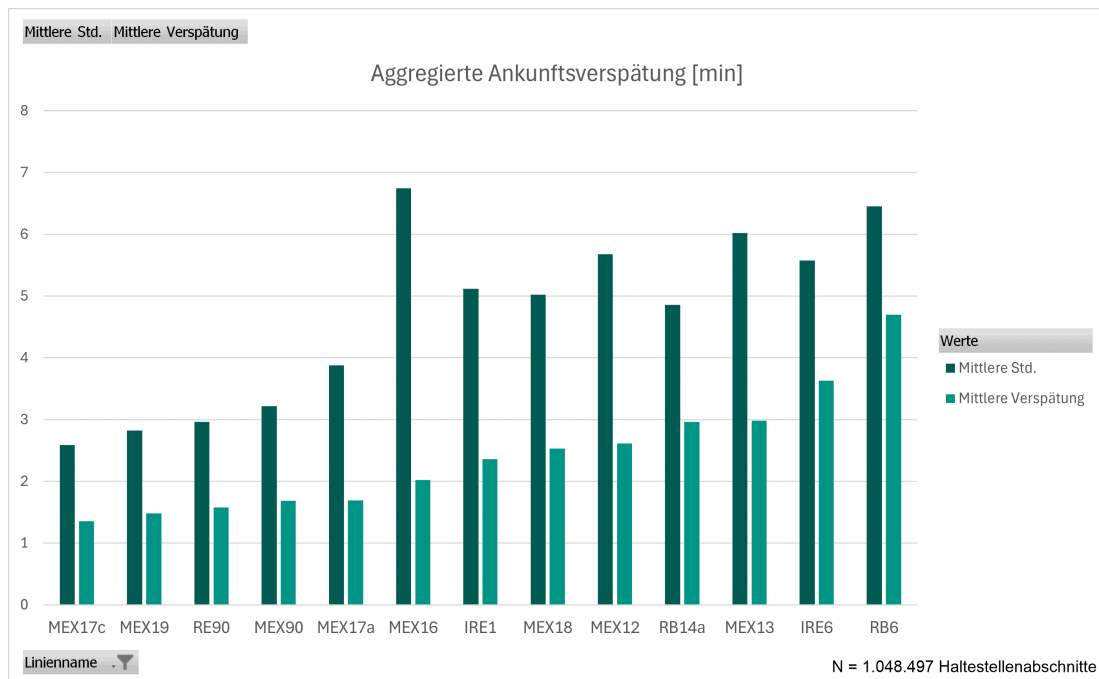


Abbildung 6.3: Verspätungskennwerte der ausgewerteten Linien

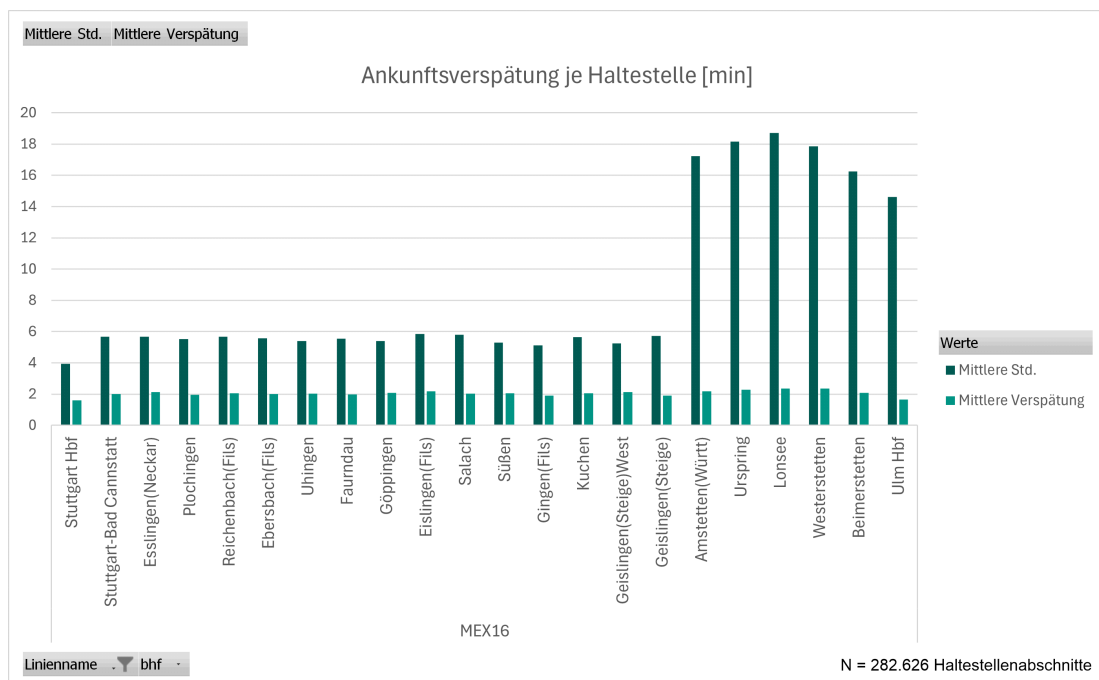


Abbildung 6.4: Verspätungskennwerte des MEX16

von Verspätungswerten kann betriebliche Gründe haben, z. B. wenn sich der Regional- und Fernverkehr eine Trasse teilen und der Regionalverkehr aufgrund der Trassenbelegung des Fernverkehrs warten muss. Zudem können infrastrukturelle Gründe hohe Verspätungswerte verursachen: So kann eine eingleisige Strecke das Warten auf den entgegenkommenden Zug erfordern und zu erhöhten Verspätungswerten führen. Für den genannten Abschnitt konnten die Gründe nicht abschließend ermittelt werden. Bestimmte Linienrouten sind nicht in den Verspätungsdaten vorhanden und folglich liegen keine Werte vor. Dadurch können keine Verspätungsdaten in das VRS-Modell übertragen und die Effekte verbesserter Zuverlässigkeit nicht für diese Linienroute abgebildet werden. Das limitiert die Aussagekraft der Planfalluntersuchungen in Kapitel 6.5. Beispielhaft ist der Abschnitt Ludwigsburg - Mühlacker des MEX17c zu nennen (siehe Abbildung 6.5).

Die Verspätungswerte haben einen Mittelwert von 2,25 Minuten. 74,7 % aller Haltestellenabschnitte weisen eine Verspätung von 3 Minuten oder weniger auf. Der SPNV¹-Qualitätsbericht der NVBW hat eine Pünktlichkeitsdefinition von 5:59 Minuten Ankunftsverspätung. Für das Jahr 2024 weist die NVBW für ihre Vertragsnetze eine durchschnittliche Ankunftspünktlichkeit von 88,11 % aus (NVBW – Nahverkehrsgesellschaft Baden–Württemberg mbH, 2024). Die ausgewerteten Linien weisen eine Pünktlichkeitsquote von 87,7 % unter dieser Pünktlichkeitsdefinition auf (siehe Abbildung 6.6). Das gängige Bild von hohen Verspätungen im Regionalverkehr (Lampe, 2025) kann also durch die ausgewerteten Regionalverkehrsdaten für die Fahrplanperiode vom 10.12.2013 bis 31.07.2024 der Region Stuttgart nicht bestätigt werden. Die Untersuchung der Verspätungswerte im Tagesverlauf (siehe Abbildung 6.7) zeigt von 8:00 bis 20:00 Uhr eine relativ konstante Verteilung. Es zeigen sich geringe Anzeichen von Verspätungen, welche durch höhere Fahrgastzahlen während der Morgens- und Nachmittagsspitze verursacht werden. Die mittlere Verspätung von 8:00 bis 20:00 Uhr liegt zwischen 2,31 und 2,59 Minuten und steigt im Tagesverlauf leicht an. Abends und Nachts fällt die mittlere Verspätung auf 1,66 Minuten. In dieser Zeit ist jedoch die Streuung am höchsten mit 6,41 Minuten. Dies hängt damit zusammen, dass der Stundenblock von 20:00 bis 8:00 Uhr den größten Zeitraum abdeckt. Zudem sind Nachtfahrten durch geringe Fahrplanzeitabweichungen geprägt, während insbesondere morgens die Verspätungen wieder größer werden, was in einer größeren Streuung resultiert. Die Standardabweichung im Tagesverlauf liegt bei 5,28 Minuten.

¹Schienenpersonennahverkehr

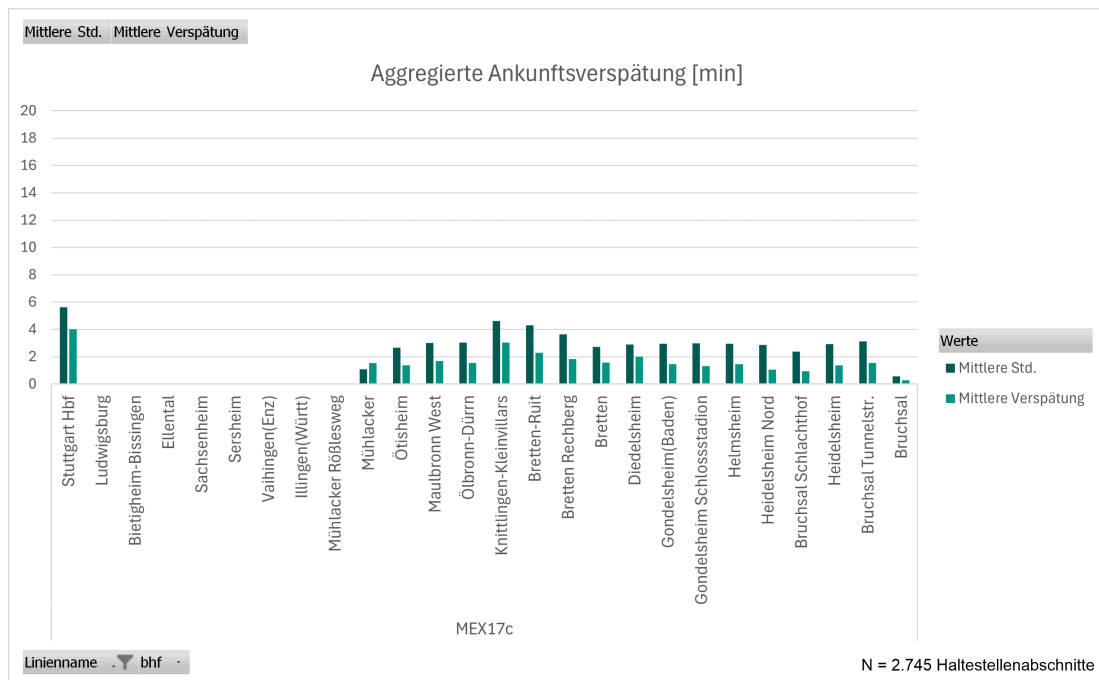


Abbildung 6.5: Verspätungskennwerte des MEX17c

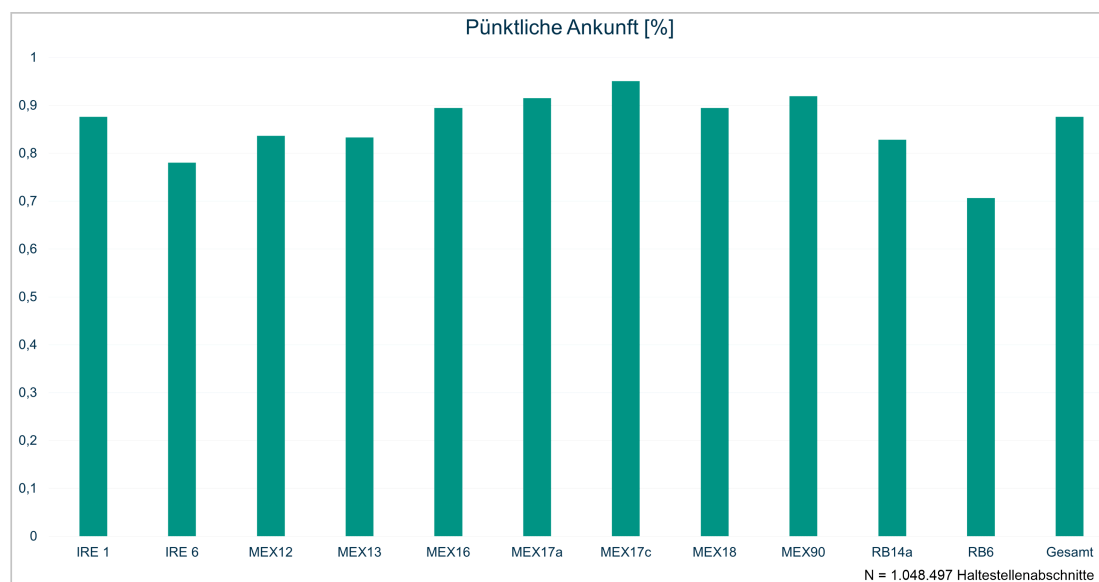


Abbildung 6.6: Pünktlichkeitsquote der ausgewerteten Linien

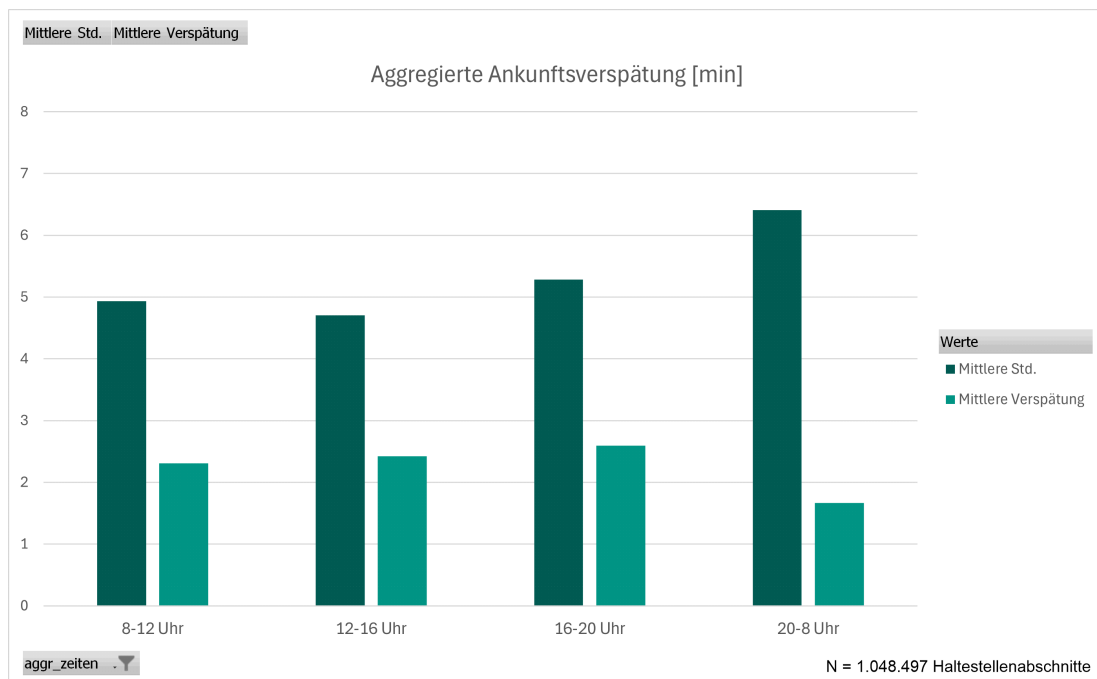


Abbildung 6.7: Verspätungskennwerte im Tagesverlauf

Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verspätungswerte

Die Asymmetrie einer Wahrscheinlichkeitsverteilung wird mit der Schiefe (γ_m) beschrieben. Verteilungen die linksschief sind, weisen eine negative Schiefe auf $\gamma_m < 0$, rechtsschiefe Verteilungen eine positive $\gamma_m > 0$. Idealerweise ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Verspätungen nicht normalverteilt, sondern rechtsschief. Das bedeutet, dass Verspätungen, die kleiner als der Mittelwert sind, häufiger auftreten und hohe Verspätungen seltener auftreten. Der Modus befindet sich links vom Mittelwert. Allgemein steigt die Kurve schnell an und flacht stark ab. Die Analyse der Symmetrien der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Verspätungsdaten aller Regionalzüge zeigt, dass die meisten Linien eine rechtsschiefe Verteilung aufweisen (siehe Tabelle 6.1). Zwei Züge (MEX18, IRE1) haben eine starke rechtsschiefe Verteilung mit $\gamma_m > 1$. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Verspätungen der Linien MEX12, MEX13 und RB14a sind annähernd normalverteilt. Damit zeigen die meisten Züge ein plausibles Verspätungsverhalten mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von niedrigen Verspätungen und einer abnehmenden Wahrscheinlichkeit von hohen Verspätungen. Die ausgewerteten Verspätungsdaten können folglich als valide eingestuft werden.

Zugnummer	Schiefe γ_m	Interpretation
IRE 1	1,368	rechtsschief
IRE 6	0,982	rechtsschief

Zugnummer	Schiefe γ_m	Interpretation
MEX12	-0,054	annähernd normalverteilt
MEX13	0,326	annähernd normalverteilt
MEX16	0,635	rechtsschief
MEX17a	0,902	rechtsschief
MEX17c	0,774	rechtsschief
MEX18	2,081	rechtsschief
MEX90	0,741	rechtsschief
RB14a	-0,201	annähernd normalverteilt
RB6	0,593	rechtsschief

Tabelle 6.1: Asymmetrie der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verspätungswerte (Schiefe)

Eine ideale Wahrscheinlichkeitsverteilung kann sehr gut durch den MEX18 aufgezeigt werden. Die Dichtefunktion der Verspätungswerte zeigt eine ausgeprägte rechtsschiefe Verteilung (siehe Abbildung 6.8). Geringe Verspätungswerte sind häufig vorhanden und hohe Verspätungswerte flachen zum Ende der Verteilung ab. Die blaue Linie zeigt die Exponentialverteilung für den MEX18 als eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Länge der Verspätungen. Der starke Abfall zeigt die abnehmende Wahrscheinlichkeit von hohen Verspätungswerten.

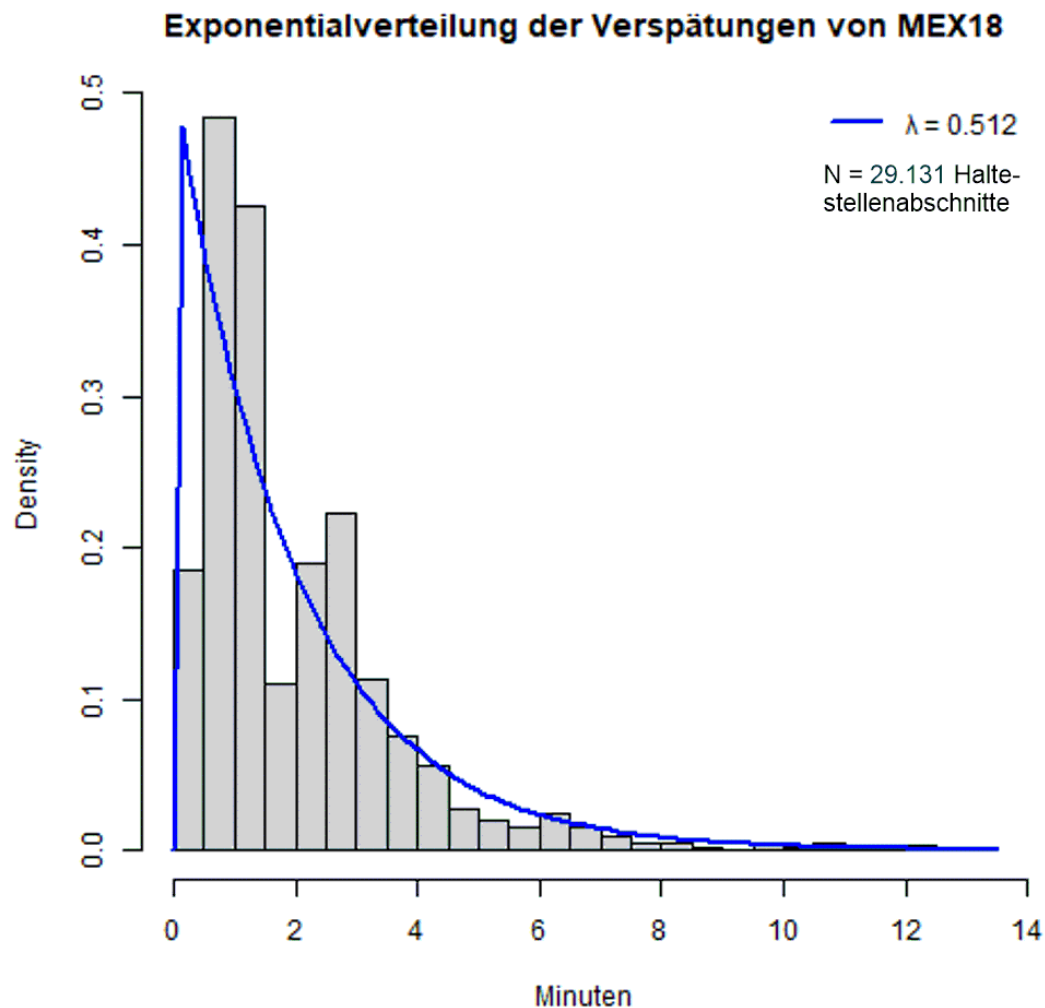


Abbildung 6.8: Dichtefunktion der Verspätungen des MEX18

Fazit der Ergebnisse der Linienverspätungen

In der Analyse der Verspätungswerte zeigt sich, dass die meisten Verspätungen eher moderat ausfallen, zudem kann in fast 9 von 10 Fällen das Pünktlichkeitsziel der NVBW eingehalten werden. Aufgrund der nahezu konstanten mittleren Verspätung im Tagesverlauf kann kein Zusammenhang von hohen Fahrgastzahlen der Morgens- und Nachmittagsspitze auf die Verspätungswerte festgestellt werden. Lediglich nachts sinkt die mittlere Verspätung und die Standardabweichung steigt. Die meisten Züge haben eine rechtsschiefe Wahrscheinlichkeitsverteilung, was auf eine hohe Anzahl an niedrigen Verspätungswerten und ein Abflachen der Wahrscheinlichkeitsverteilung nach rechts hindeutet. Im nächsten Kapitel 6.3 werden die Erkenntnisse der Verknüpfung der ausgewerteten Verspätungsdaten mit den GTFS-Daten vorgestellt.

6.3 Iterative Verknüpfung der Verspätungskennndaten

Im Forschungsprozess ist ersichtlich geworden, dass ein Teil der Verknüpfungsbedingungen (siehe Kapitel 5.3) Datenbearbeitungsschritte erfordert, welche nun beschrieben werden. Zudem wurden in einem iterativen Prozess die Verknüpfungsbedingungen schrittweise reduziert, um eine hohe Anzahl an Haltestellenabschnitten mit Verspätungsdaten zu verknüpfen. Die notwendigen Verknüpfungsbedingungen und die entsprechenden Datenbearbeitungsschritte sind:

1. Verknüpfungsbedingung ist die Liniennummer. In den GTFS-Daten liegen diese vor, für die Verspätungsdaten wurden diese im Zuge der Haltestellenfolgeabfrage in *R* zugeordnet.
2. Verknüpfungsbedingung ist die Haltestellenbezeichnung. Diese Bedingung ist schwieriger zu erfüllen. Die GTFS-Daten enthalten die Haltestellenbezeichnungen der NVBW und die Verspätungsdaten haben die Haltestellenbezeichnungen aus den Kursbüchern der Deutschen Bahn. Diese weichen geringfügig voneinander ab und verhindern die Verknüpfung. So ist der Haltestellenname in den Kursbüchern: 'Stuttgart Hbf' und in den GTFS-Daten: 'Stuttgart Hauptbahnhof (oben)'. Um die Verknüpfung durchzuführen, wurde statt dem Haltestellenamen die Haltestellennummer verwendet. Den Haltestellen aus dem Verspätungsdatensatz wurden die Haltestellennummern aus den in *PTV VISUM* importierten GTFS-Daten zugeordnet. Anschließend gelang so die Verknüpfung.
3. Verknüpfungsbedingung ist die Richtung. Die Richtungsbezeichnung ist in den Verspätungsdaten nicht angegeben. Sie wurde den identifizierten Linienrouten während der Haltestellenfolgeabfrage zugeordnet. Für die GTFS-Daten liegen diese in *PTV VISUM* vor.
4. Verknüpfungsbedingung sind die aggregierten Stundenblöcke. Die Verspätungsdaten wurden anhand der Abfahrtszeit in vier Stundenblöcke aggregiert. Die Aggregation der GTFS-Daten in vier Stundenblöcke erfolgte in *PTV VISUM* durch ein Formelattribut.
5. Verknüpfungsbedingung ist die Anzahl der Haltestellen als Zuordnung der Linienroute. In den GTFS-Daten liegen diese vor, für die Verspätungsdaten wurden diese im Zuge der Haltestellenfolgeabfrage in *R* zugeordnet.

Durch dieses Verfahren konnten im ersten Schritt mit *R* für 59,33 % der GTFS-Fahrplanfahrtelemente Verspätungskennwerte zugeordnet werden. Die nächsten Verknüpfungsschritte wurde in *Excel* durchgeführt. Im zweiten Schritt wurden die Verspätungskennwerte den übrigen Fahrplanfahrtelementen über die vier Verknüpfungsbedingungen Liniennummer, Haltestelle, Anzahl Haltestellen und Stundenblock ohne Betrachtung der Richtung zugeordnet. Dadurch ist der Anteil auf 79,01 % gestiegen. Im dritten Schritt wurde die Verknüpfungsbedingung Anzahl Haltestellen weggelassen und

die Verknüpfung fand über Liniennummer, Haltestelle und Stundenblock statt. Danach sind für 95,58 % der Fahrplanfahrtelemente Verspätungsdaten vorhanden. Die Abbildung 6.9 zeigt die schrittweise Verknüpfung der Verspätungswerte basierend auf den jeweiligen Verknüpfungsbedingungen. Anschließend wurden die GTFS-Daten inklusive

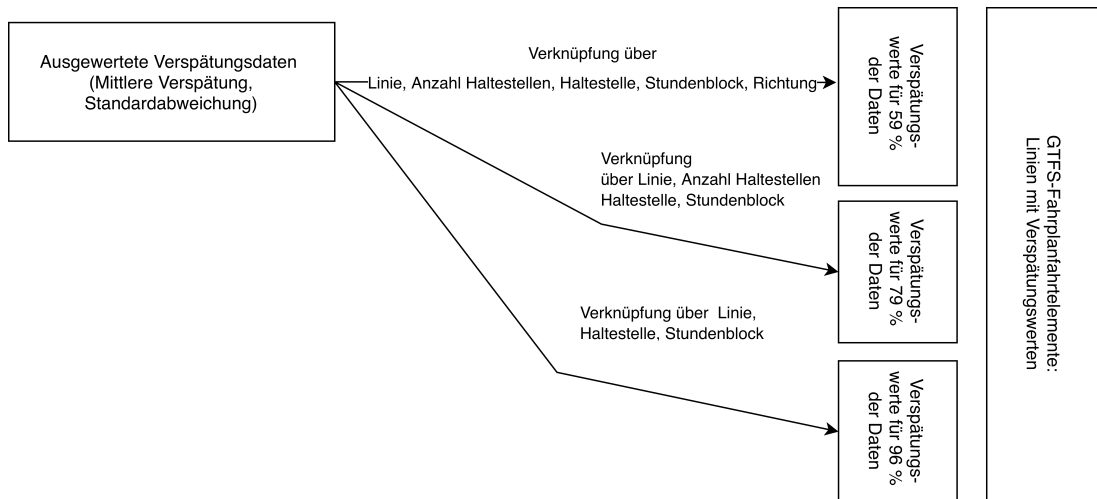


Abbildung 6.9: Steigerung der verknüpften Verspätungsdaten mit den GTFS-Daten

der Verspätungskennwerte in das VRS-Nachfragemodell importiert. Dies diente der Bereitstellung von Verspätungswerten für die Nachfragemodellierung.

6.4 Harmonisierung der Angebots- und Nachfragedaten

Die GTFS-Angebotsdaten mit Verspätungskennwerten wurden über die *PTV VISUM*-Funktion *Import von ÖV-Angebot* in das VRS-Modell importiert. Alle GTFS-Fahrtabschnitte wurden dabei aus dem Quellnetz in das Zielnetz (VRS-Modell) übertragen. Die Anbindung der Fahrten an die Infrastruktur des Zielnetz lief über die Verknüpfung der Haltestellen beider Netze. Diese Verknüpfung gewährleistet, dass die importierten GTFS-Fahrplanfahrtelemente dieselben Haltestellen nutzen wie die Linien im VRS-Netz und eine Umlegung für alle Linien gerechnet werden kann. Zudem ist so der Umstieg zwischen den Linien der beiden Netze möglich. Durch einen Attributvergleich konnten die Haltestellen verknüpft werden. Im Forschungsprozess hat sich allerdings gezeigt, dass dieser Schritt aufgrund abweichender Haltestellennamen und -nummern einer Anpassung der Datenstruktur bedurfte. Der Attributvergleich basiert auf der Zuordnung der VRS-Haltestellennummern zu den GTFS-Haltestellen. Die Zuordnung wird iterativ über den Vergleich der Haltestellennamen der beiden Netze durchgeführt. Anschließend erfolgte der Import der GTFS-Daten mit den VRS-Haltestellennummern als Verknüpfungsattribut.

Haltestellen, die nicht verknüpfbar waren, wurden auf bestehenden Knoten oder Stre-

cken im Zielnetz eingefügt. Anschließend erfolgte die manuelle Anbindung dieser Haltestellen an das Netz. Da im bestehenden Netz die gleichen Strecken wie in den GTFS-Daten genutzt werden, wurde auf ein zusätzliches Einfügen von Strecken verzichtet. Die grundlegende Architektur des ÖV-Netzmodells bleibt so erhalten und stellt damit eine konsistente Modellgrundlage dar. Basierend auf diesem Netzmodell konnte nun die angepasste Verkehrsmittelwahl mit den Verspätungskennwerten berechnet werden. Die Harmonisierung der Haltestellenbezeichnungen ermöglichte die Zuordnung der Haltestellen des GTFS-Netzes zu den Haltestellen des VRS-Netzes. Damit wurde ein Bindeglied zwischen den importierten GTFS-Angebotsdaten und der modellseitigen Nachfrage und die Voraussetzung für eine funktionierende Umlegung geschaffen. Die Alternative wäre eine aufwendige manuelle Anbindung aller GTFS-Haltestellen an die Haltestellen und Bezirke des VRS-Netzes gewesen.

6.5 Anpassungen der Verkehrsmittelwahlmodellierung

Die Verkehrsmittelwahlmodellierung setzt Anpassungen voraus, deren Implikation in diesem Kapitel erläutert werden. Zuerst wird die ÖV-Kenngrößenberechnung für die mittlere Verspätung erläutert. Anschließend wird auf die Anpassung der bestehenden Nutzenfunktion und die verwendeten Parameter eingegangen. Die Modellergebnisse der Verkehrsmittelwahl der Planfälle werden zuletzt erläutert.

Die Kennziffern für die Bewertung der Planfälle sind Fahrgastgewinne. Die Auswirkungen auf die Umlegung werden durch die mittlere und summierte Beförderungsleistung dargestellt. Die Fahrgastgewinne werden durch die Nachfragematrizen der Verkehrsmittelwahl berechnet. Die Beförderungsweiten werden aus der Umlegungsstatistik entnommen. Zur Vereinfachung wird bei der Umlegung eine konstante Nachfrage im Tagesverlauf angenommen, da für die angepassten Nachfragematrizen keine Ganglinien vorliegen. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da die Verkehrsnachfrage üblicherweise im Tagesverlauf variiert (Pinkofsky, 2005). Trotz der Berechnung dieser absoluten Zahlen erfolgt die Beschreibung der Planfälle überwiegend qualitativ und im Verhältnis zu einander. Diese ist mit der Konzeption der Planfälle zu erklären. Es werden unterschiedliche Verhältnisse bei der Bewertung der Varianz der Reisezeit untersucht. Folglich sind die Ergebnisse auch im Verhältnis zu einander zu bewerten. Die absolute Darstellung der Fahrgastgewinne und Beförderungsweiten dient der Einordnung der Auswirkungen der angepassten Verkehrsmittelwahl.

Kenngrößenberechnung der mittleren Verspätung

Dieses Unterkapitel beschreibt das Vorgehen der ÖV-Kenngrößenberechnung und anschließend die räumliche Verteilung der mittleren Verspätungen aggregiert für Oberbezirke. Die zusätzliche ÖV-Kenngrößenmatrix *Mittlere_Verspätung* wird durch die Kenngröße eines Teilweg-Attributs (*End-Fahrzeitprofilelement\LetzterWert:Fahrplanfahrtelemente\Mittlere_Verspaetung*) berechnet. Das Attribut gibt den letzten Wert der Verspätung (*LetzterWert:Fahrplanfahrtelemente\Mittlere_Verspaetung*) am Ausstiegshaltepunkt (*End-Fahrzeitprofilelement*) an. Dieses Teilweg-Attribut wird für jede Bezirks-Beziehung für alle zu untersuchenden Verkehrsmittel aufsummiert. Dabei werden im ersten Schritt alle ÖV-Linien betrachtet und im zweiten Schritt nur die Regionalzüge mit Verspätungsdaten. Diese zwei Berechnungsweisen haben unterschiedliche Auswirkungen auf die ÖV-Kenngrößenmatrix *Mittlere_Verspätung*, die nun erläutert werden. Die summierten mittleren Verspätungen für alle ÖV-Linien beinhaltet Haltestellenabschnitte ohne Verspätungsdaten (z. B. S-Bahnhalte). Folglich werden Verspätungsdaten für alle Bezirksbeziehungen ausgegeben, sie werden jedoch durch Fahrten mit Verkehrsmitteln ohne Verspätungen abgemindert. Der Effekt dieser Berechnungsweise der ÖV-Kenngrößenmatrix wird beispielhaft anhand der mittleren Verspätung der Stuttgarter Innenstadtbezirke Richtung Schorndorf gezeigt (siehe Abbildung 6.10).

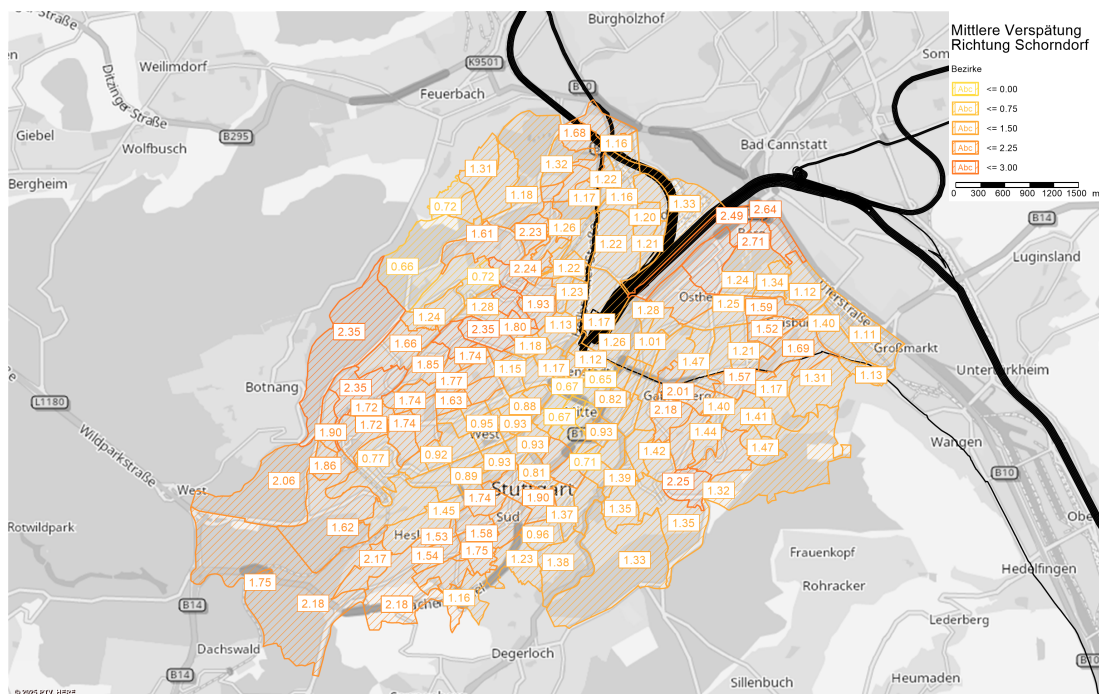


Abbildung 6.10: Betrachtung aller ÖV-Linien: Mittlere Verspätung der Bezirksbeziehungen Richtung Schorndorf

Die Bezirke weisen variierende Verspätungswerte auf. Diese Variation ist kritisch zu

bewerten, da alle Bezirke über die gleichen Regionalzüge nach Schorndorf verbunden sind. Folglich sollten die Verspätungsdaten für alle Bezirke identisch sein. Da auch andere Verkehrssysteme ohne Verspätungsdaten bei der Kenngrößenberechnung betrachtet werden, wird die summierte Verspätung durch diese Verkehrsmittel abgemindert. Dieser Effekt tritt auch auf, wenn nur die Regionalzüge mit Verspätungsdaten betrachtet werden, wie die Abbildung 6.11 für dieselben Bezirke zeigt. Die Bezirke mit dem Wert 0 sind nicht an eine Regionalzug-Haltestelle (Stuttgart Hbf) angebunden, folglich wird für die Bezirke keine mittlere Verspätung berechnet. Die Bezirke, die an den Stuttgarter Hauptbahnhof angebunden sind, weisen im Gegensatz zur Abbildung 6.10 eine höhere mittlere Verspätung auf, da die Abmilderung nur durch die Fuß-Anbindung entsteht.

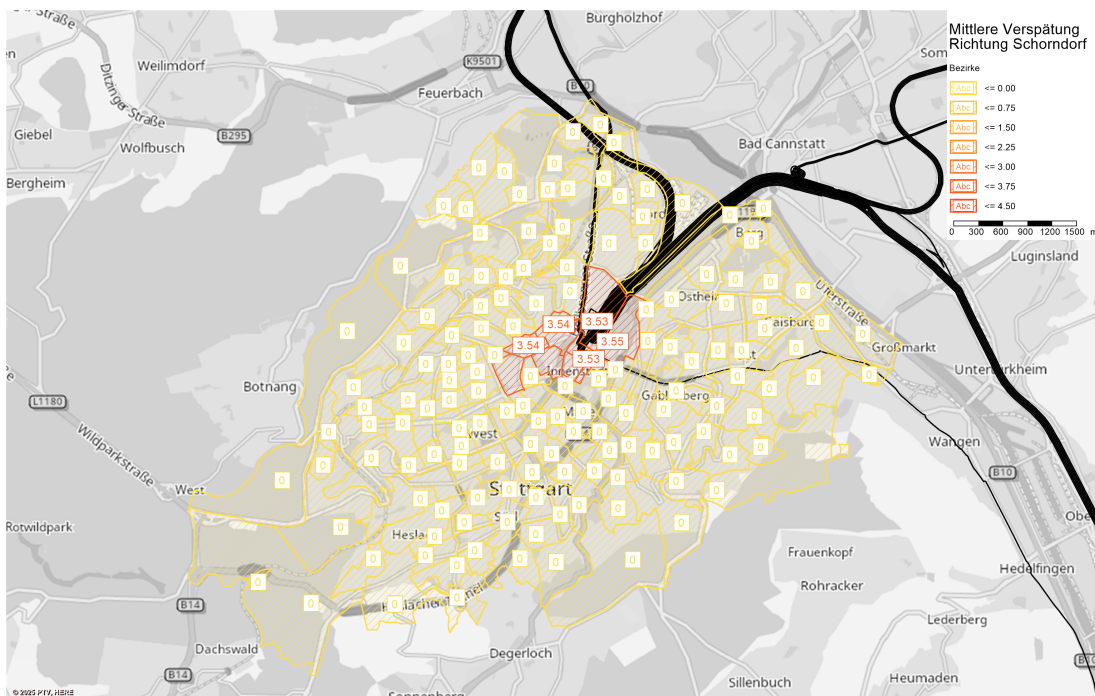


Abbildung 6.11: Betrachtung Regionalzüge mit Verspätungsdaten: Mittlere Verspätung der Bezirksbeziehungen Richtung Schorndorf

Die Kenngrößenberechnung erweist sich hier als Limitierung des Forschungsziels. Effekte einer veränderten Verkehrsmittelwahl können nur für Bezirke mit Werten für die mittlere Verspätung berechnet werden. Bei Bezirken mit gleichem Regionalzugangebot sollten die Verspätungswerte nicht variieren, um die adäquate Abbildung der Effekte zu ermöglichen. Abhilfe könnte durch die Bereitstellung von Verspätungsdaten für alle ÖV-Linien geschaffen werden. Beim Vergleich der beiden Berechnungsweisen zeigt sich die Berechnung der ÖV-Kenngrößen für allen ÖV-Linien als zielführender, um Verspätungsdaten für mehr Bezirke abzubilden und dadurch die Effekte einer verbesserten Zuverlässigkeit umfassender zu beschreiben.

Abbildung 6.12 stellt die aggregierte ÖV-Kenngrößenmatrix *Mittlere_Verspätung* auf Oberbezirksebene und die 50 Oberbezirksbeziehungen mit den größten mittleren Verspätungen dar. Grundlage ist der Durchschnitt der mittleren Verspätungen der jeweils zugeordneten Bezirke. Die Zuordnung der Bezirke zu den Oberbezirken wurde durch die VRS-Modellerstellenden durchgeführt (Schlaich et al., 2012). Die Bezirke südwestlich von Stuttgart weisen sehr geringe mittlere Verspätungen auf, da dort keine Regionalzüge mit Verspätungsdaten verkehren und Verzögerungen primär aus Umstiegen resultieren. Höhere Werte treten nördlich und nordöstlich der Stadt auf (Linien MEX12, MEX18, MEX19, MEX90). Deutliche Verspätungswerte ergeben sich für die Oberbezirke östlich und südöstlich von Stuttgart, insbesondere für Schorndorf, Geislingen und Göppingen. Diese Gebiete werden durch IRE1, MEX13 und MEX16 bedient. Einzelne Gebiete, die erhöhte Verspätungswerte aufzeigen sind Plochingen, Esslingen und Vaihingen. Der Oberbezirk von Stuttgart zeigt keine erhöhten Verspätungswerte, da viele Züge dort starten und ohne Anfahrtsverspätung losfahren.

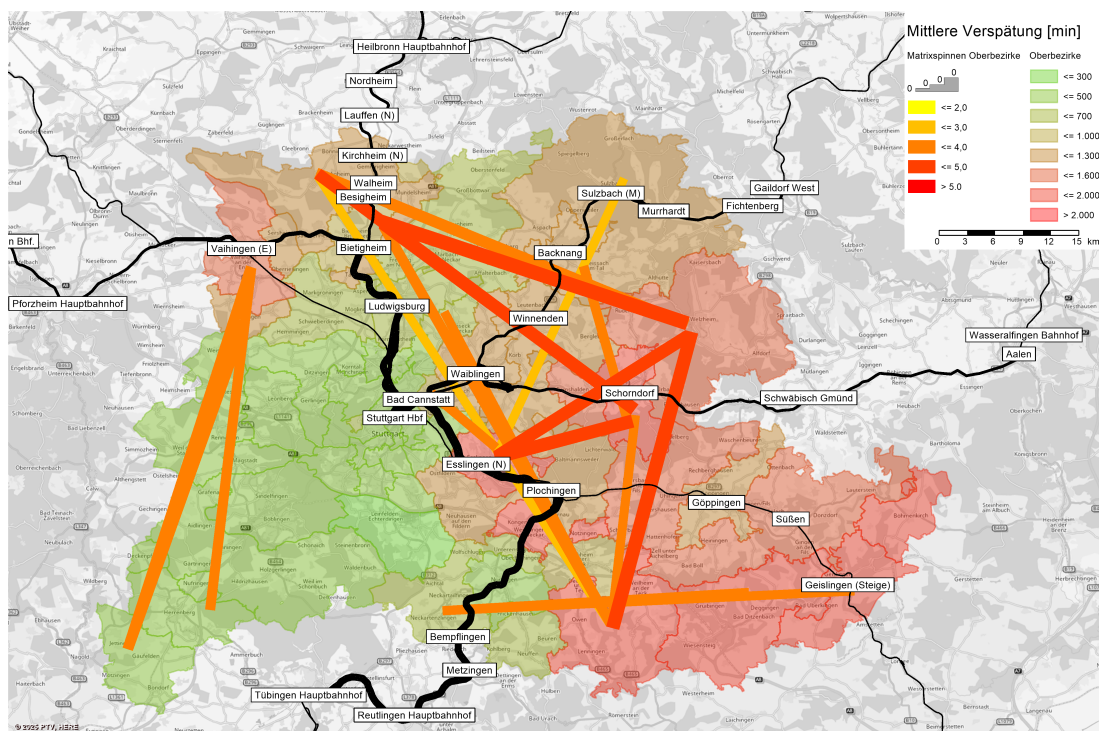


Abbildung 6.12: Mittlere Verspätung aggregiert für Oberbezirke

Der Abgleich der durchschnittlichen Verspätungsdaten auf Oberbezirksebene (Abbildung 6.12) mit den Verspätungsdaten der einzelnen Regionalzüge (Abbildung 6.3) wird zur Plausibilisierung und Erklärung der räumlichen Auswirkungen der Verspätungen genutzt. Die Linien MEX12 und MEX18 sind von Heilbronn nach Tübingen durchgebunden und die Bezirke entlang der Strecke weisen geringe Verspätungswerte auf, obwohl die Züge im Mittel hohe Verspätungswerte haben. Auf dieser Strecke überlagern sich

mehrere Linien und erhöhen so das Taktangebot auf der Strecke. Der gegenteilige Effekt ist für den MEX16 erkennbar. Die Linie hat eine geringere mittlere Verspätung als der MEX12 und MEX18 und bindet die südöstlichen Gebiete von Ulm bis Stuttgart an. Vor allem die Bezirke Geislingen Mittelzentrum und Verflechtungsbereich und Esslingen zeigen jedoch hohe Verspätungswerte. Dies hängt mit den notwendigen Umstiegen für Ziele ab Stuttgart zusammen. Außerdem sind zur flächigen Erschließung der Gebiete Umstiege auf Regional- und Nahverkehrsbusse notwendig. Nordöstlich von Stuttgart fahren der MEX19 und MEX90 und diese Verbindungen fahren nur bis Stuttgart. Aufgrund der geringen Verspätungswerte der Linien und der verhältnismäßig guten Erschließung sind die Verspätungswerte trotz des Bedarfs an Umstiegen moderat. Die östlichen Gebiete entlang des IRE1 und MEX13 weisen hohe Verspätungswerte trotz des dichten Taktangebotes auf. Dies hängt mit den hohen Verspätungswerten der beiden Linien zusammen. Die Abmilderung der Verspätung aufgrund der Durchbindung des IRE1 tritt weniger signifikant im Vergleich zu den anderen Linien auf. Zusammenfassend ist erkennbar, dass die Anzahl an Fahrplanfahrtüberlagerungen, die Durchbindung der Linien, die damit einhergehende Vermeidung von Umstiegen und die flächige Erschließung in geringeren Verspätungswerten resultieren. Diese Indikatoren treffen vor allem auf den Korridor von Esslingen bis Bietigheim zu und erklären die geringen Verspätungswerte in diesem Bereich. In dem nächsten Kapitel wird die Änderung der Verkehrsmittelwahlnutzenfunktion erläutert, die basierend auf der ÖV-Kenngrößenberechnung die Moduswahl abbildet.

Anpassung der Verkehrsmittelnutzendefinition

Bei der Implementierung der Verkehrsmittelwahlnutzenfunktion waren die Parameter der Reisezeitvarianz aus den Modellen zur Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit (siehe Kapitel 4.2) anzupassen. Hintergrund ist, dass diese Modelle die Reisezeit bewerten, das VRS-Modell jedoch nicht. Das VRS-Modell berücksichtigt stattdessen die Fahr-, Zu-, Abgangs- und Wartezeit (siehe Kapitel 4.1). Zur konsistenten Abbildung der Reisezeitzuverlässigkeit in der Verkehrsmittelwahl bedurfte es einer Anpassung der bestehenden Nutzenfunktion. Ziel ist, dass die Bewertung der Reisezeitzuverlässigkeit im Verhältnis zur Reisezeit konstant bleibt. Die Anpassung wurde über den Parameter der Fahrzeit im Fahrzeug durchgeführt, da dieser dem Reisezeitparameter inhaltlich ähnelt. Zunächst wurde das (RR) der Reisezeitzuverlässigkeitsmodelle berechnet und anschließend mit dem Fahrzeitparameter des VRS-Modells ($\beta_{\text{Fahrzeit, VRS-Modell}}$) multipliziert. Die Formel (6.2) illustriert die Berechnung für Planfall 1 ($RR = 3,7$), welcher auf dem *scheduling model* von Klinkhardt et al. (2025) beruht:

$$(6.1) \quad RR_{\text{scheduling_model}} = \frac{\text{Parameter der Reisezeitvarianz}}{\text{Parameter der Reisezeit}} = \frac{\beta_{tt_dm}}{\beta_{tt_s}}$$

$$\begin{aligned}\beta_{\text{mittlere_Verspätung,PF1}} &= RR_{\text{scheduling_model}} \cdot \beta_{\text{Fahrzeit,VRS-Modell}} = \frac{-0,111}{-0,03} \cdot -0,0654 \\ (6.2) \qquad \qquad \qquad &= -0,24198\end{aligned}$$

Die Anpassung der Parameter für die Planfälle 2 und 3 ergibt: $\beta_{\text{mittlere_Verspätung,PF2}} = -0,17658$, $\beta_{\text{mittlere_Verspätung,PF3}} = -0,0654$. Da Fall 3 von einem gleichen Verhältnis von dem Parameter für die Reisezeitvarianz und der Reisezeit ausgeht, ist $\beta_{\text{mittlere_Verspätung,PF3}} = \beta_{\text{Fahrzeit,VRS-Modell}} = -0,0654$. Der Vergleich des angepassten Parameters $\beta_{\text{mittlere_Verspätung,PF1}} = -0,24198$ mit dem Parameter $\beta_{tt_dm} = -0,111$ zeigt, dass eine direkte Berücksichtigung des Parameters β_{tt_dm} die Reisezeitabweichung zu gering bewertet hätte und sich diese weniger stark auf die Verkehrsmittelwahl ausgewirkt hätte. Dies begründet die Anpassung des zu integrierenden Parameters, um die Reisezeitzuverlässigkeit in der Verkehrsmittelwahl korrekt zu berücksichtigen.

Das nächste Kapitel stellt dar, wie die angepasste Verkehrsmittelwahlnutzenfunktionen für die Berechnung der Basis- Analysennull-, und Planfälle verwendet wird.

Ermittlung des Ausgleichsfaktors für Analysenull- und Planfall

Die Berechnung des Basisfalls erfolgte mit der bestehenden Nutzenfunktion und dem ÖV-Angebot ohne Verspätungskennwerte. Danach wurde die Verkehrsmittelwahl mit dem angepassten Parameter $\beta_{\text{mittlere_Verspätung}}$ und der Kenngrößenmatrix für die mittlere Verspätung berechnet. Dieser Zwischenschritt zeigt die negativen Effekte der Berücksichtigung von Verspätungen. Die Analysenullfälle gleichen diesen negativen Faktor in der Nutzendefinition aus. Dies kann durch eine generelle Anhebung des Grundnutzens des ÖV ($\alpha_{\text{Grundnutzen,ÖV}}$) oder durch die Anpassung einzelner Parameter erfolgen. Die pauschale Anhebung des ÖV-Grundnutzens wirkt asymmetrisch. So werden kürzere Verbindungen gestärkt, da die Verspätungen sich hier geringer auf die Verkehrsmittelwahl auswirken und gleichzeitig der Grundnutzen einen hohen pauschalen Verbesserung darstellt. Bei längeren Verbindungen kehrt sich der Effekt um. Verspätungen wirken sich stärker auf die Wahl aus und der Grundnutzen mindert hier die Effekte der Verspätungen weniger stark ab. So zeigte der Vergleich des Basisfalls mit dem Analysenullfall 0 die gleiche Nachfrage von 1.168.826 Personen, jedoch liegt die Gesamtbeförderungsweite des Basisfalls bei 7.565.176 km und die des Analysenullfalls beträgt 7.411.058 km. Die Erhöhung des Parameters der Fahrzeit im Fahrzeug (β_{Fahrzeit}) ist zielführender und wirkt sich symmetrischer auf kurze und lange Verbindungen aus. Für jeden der drei Analysenullfälle wurden die Parameter der Fahrzeit im Fahrzeug solange angepasst bis die Nachfragesumme des Basisfalls annähernd erreicht wurde. Um die Wirkung des angehobenen Parameters für die Fahrzeit zu zeigen, wird der Analysefall 1 mit dem Basisfall verglichen. Die Nachfragesummen der beiden Fälle sind identisch mit 1.168.826 Personen. Die Gesamtbeförderungsweite

mit den öffentlichen Verkehrsmitteln für den Basisfall ist 7.565.176 km und höher als die des Analysenullfalls 1 mit 7.560.433 km. Die Abweichung beträgt 4.743 km und zeigt, dass auch bei der Anpassung des Fahrzeitparameters kürzere Verbindungen bevorzugt gewählt werden. Um sich der Gesamtbeförderungsweite des Basisfalls stärker anzunähern, wäre die Anpassung der Gewichtung für die Gesamtreisezeit sinnvoll. Die bestehende Nutzenfunktion des VRS-Modells berücksichtigt diesen Faktor jedoch nicht (Schlaich et al., 2012). Für das Forschungsziel dieser Masterarbeit ist ausreichend, dass die Nachfragesumme des Basisfalls mit denen der Analysefälle gleich ist. Der Planfall wird mit angepassten Verkehrsmittelwahlnutzenfunktion und ohne Verspätungen gerechnet. Die Differenz des Planfalls und des Analysenullfalls zeigt die generierten Fahrgastgewinne aufgrund eines pünktlichen Betriebs. Diese sind auf den positiven Ausgleichsfaktor zurückzuführen.

Tabelle 6.2 gibt eine kompakte Übersicht über die genutzten Parameter zur Kalibrierung der Verkehrsmittelwahlfunktionen. Zudem werden die Nachfragesummen für die untersuchten Basis-, Analysenull- und Planfälle gezeigt. Der Bestandsfahrzeitparameter ist $\beta_{\text{Fahrzeit,VRS-Modell}} = 0,0654$.

Fall	Parameter	Nachfrage
Basisfall	$\beta_{\text{Fahrzeit,VRS-Modell}} = 0,0654$	1.168.826
Basisfall 1 mit Berücksichtigung der Verspätung	$\beta_{\text{mittlere_Verspätung, PF1}} = -0,24198$	1.142.171
Basisfall 2 mit Berücksichtigung der Verspätung	$\beta_{\text{mittlere_Verspätung, PF2}} = -0,17658$	1.148.461
Basisfall 3 mit Berücksichtigung der Verspätung	$\beta_{\text{mittlere_Verspätung, PF2}} = -0,0654$	1.160.638
Analysenullfall 0 mit Berücksichtigung der Verspätung	$\beta_{\text{mittlere_Verspätung, PF1}} = -0,24198$ $\alpha_{\text{Grundnutzen,OeV}} = 0,0331591$	1.168.826
Analysenullfall 1 mit Berücksichtigung der Verspätung	$\beta_{\text{mittlere_Verspätung, PF1}} = -0,24198$ $\beta_{\text{Fahrzeit,PF1}} = -0,0632555$	1.168.826
Analysenullfall 2 mit Berücksichtigung der Verspätung	$\beta_{\text{mittlere_Verspätung, PF2}} = -0,17658$ $\beta_{\text{Fahrzeit,PF2}} = -0,0637683$	1.168.828
Analysenullfall 3 mit Berücksichtigung der Verspätung	$\beta_{\text{mittlere_Verspätung, PF3}} = -0,0654$ $\beta_{\text{Fahrzeit,PF2}} = - - 0,0647490$	1.168.826
Planfall 1 ohne Berücksichtigung der Verspätung	$\beta_{\text{Fahrzeit,PF1}} = -0,0632555$	1.196.452
Planfall 2 ohne Berücksichtigung der Verspätung	$\beta_{\text{Fahrzeit,PF2}} = -0,0637683$	1.189.750

Fall	Parameter	Nachfrage
Planfall 3 ohne Berücksichtigung der Verspätung	$\beta_{\text{Fahrzeit,PF2}} = - - 0.0647490$	1.177.101

Tabelle 6.2: Vergleich Basis-, Analyse- und Planfälle

6.6 Ergebnisse der Verkehrsmittelwahlmodellierung

In diesem Kapitel werden die Modellergebnisse der Planfälle hinsichtlich der generierten Fahrgastgewinne und räumlichen Effekte verglichen.

Planfall 1

Im Planfall 1 beträgt der *RR*-Wert 3,7 und der angepasste Fahrzeitparameter ($\beta_{\text{Fahrzeit,PF1}}$): -0,0632555. Insgesamt resultieren daraus 1.196.452 Fahrgäste, was einem Zuwachs von 27.626 Fahrgästen entspricht. Dieser ist im Vergleich zu den anderen Planfällen am höchsten, da die Reisezeitvarianz im Vergleich zur Reisezeit am stärksten bewertet wird. Folglich zeigt sich der pünktliche Betrieb am ausgeprägtesten in einer veränderten Verkehrsmittelwahl. Abbildung 6.13 zeigt die mittlere Verspätung auf Oberbezirksebene sowie die zugehörigen Matrixspinnen mit den Differenzen der Fahrgastbeziehungen zwischen Analysenull- und Planfall. Die dargestellten Balken repräsentieren die 50 Oberbezirksbeziehungen mit den größten Fahrgastgewinnen aufgrund eines pünktlichen Betriebs.

Der größte Effekt eines Systems ohne Verspätungen tritt auf der Beziehung zwischen Esslingen und Stuttgart mit über 600 zusätzlichen Fahrgästen je Richtung auf. Weitere Beziehungen mit starken Fahrgastgewinnen sind Göppingen Mittelzentrum–Göppingen Verflechtungsbereich (beide Richtungen > 700 Fahrgäste), Ludwigsburg–Bietigheim-Bissingen/Besigheim (Mittelzentrum), Waiblingen–Stuttgart, Stuttgart–Plochingen (alle > 500 Fahrgäste in beide Richtungen), Ludwigsburg–Bietigheim-Bissingen/Besigheim (Verflechtungsbereich) (beide Richtungen > 400 Fahrgäste). Auch die Verbindung Bad Cannstatt–Stuttgart profitiert stark von den Verbesserungen, obwohl auf dieser Relation schon pünktliche Bestandslinien ohne Verspätungswerte fahren. Insgesamt weisen 14 Oberbezirksbeziehungen mehr als 200 Fahrgäste auf und 32 mehr als 100. Die Relationen entlang der Strecke des MEX16 profitieren sehr stark von der Qualitätsverbesserung. Diese Effekte sind auch sichtbar in der Darstellung der Fahrgastgewinne auf Oberbezirksebene (siehe Abbildung 6.14). Hier zeigt sich deutlich, dass in den Gebieten mit hoher mittlerer Verspätung starke Fahrgastgewinne durch einen pünktlichen Betrieb erzielt werden können. Der Oberbezirk Stuttgart generiert

mehr als 2.300 zusätzliche Fahrgäste. Die Oberbezirke Ludwigsburg, Esslingen und Verflechtungsbereich Göppingen erzielen Zuwächse von über 1.700 Fahrgästen. Die Oberbezirke Waiblingen, Plochingen, Bietigheim-Bissingen/Besigheim (Mittelzentrum), Göppingen Mittelzentrum und Bad Cannstatt weisen Fahrgastgewinne von über 1.000 aus.

Die Umlegung des Planfalls 1 ergibt eine Gesamtbeförderungsweite von 7.884.522 km (+4,29 % gegenüber Analysenullfall), eine mittlere Beförderungsweite von 10,8 km (+2,46 %) und 731.590 ÖV-Personenfahrten (+1,7 %). Aufgrund des leichten Fahrtenanstiegs und der zugleich längeren ÖV-Wegekette führt eine verbesserte Zuverlässigkeit zu einem Anstieg der mittleren und Gesamt-ÖV-Wegelängen.

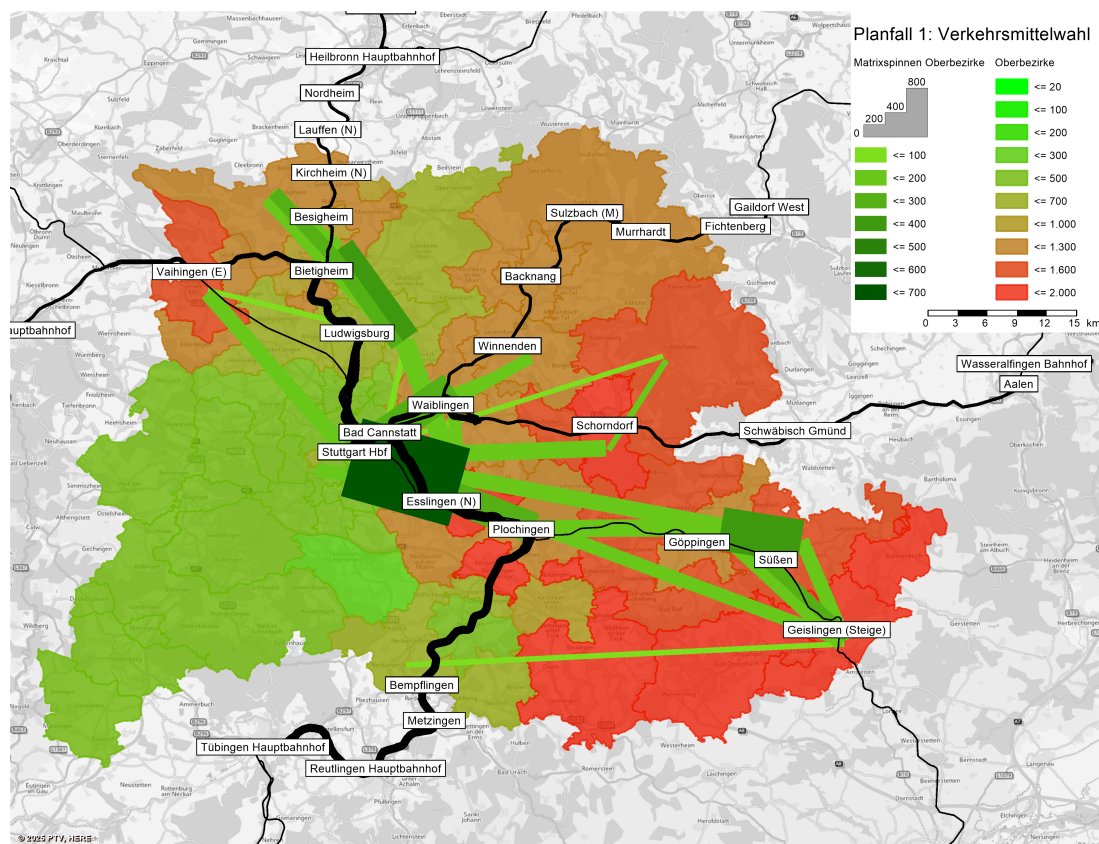


Abbildung 6.13: Planfall 1: Veränderung der Verkehrsmittelwahl aufgrund verbesserter Zuverlässigkeit

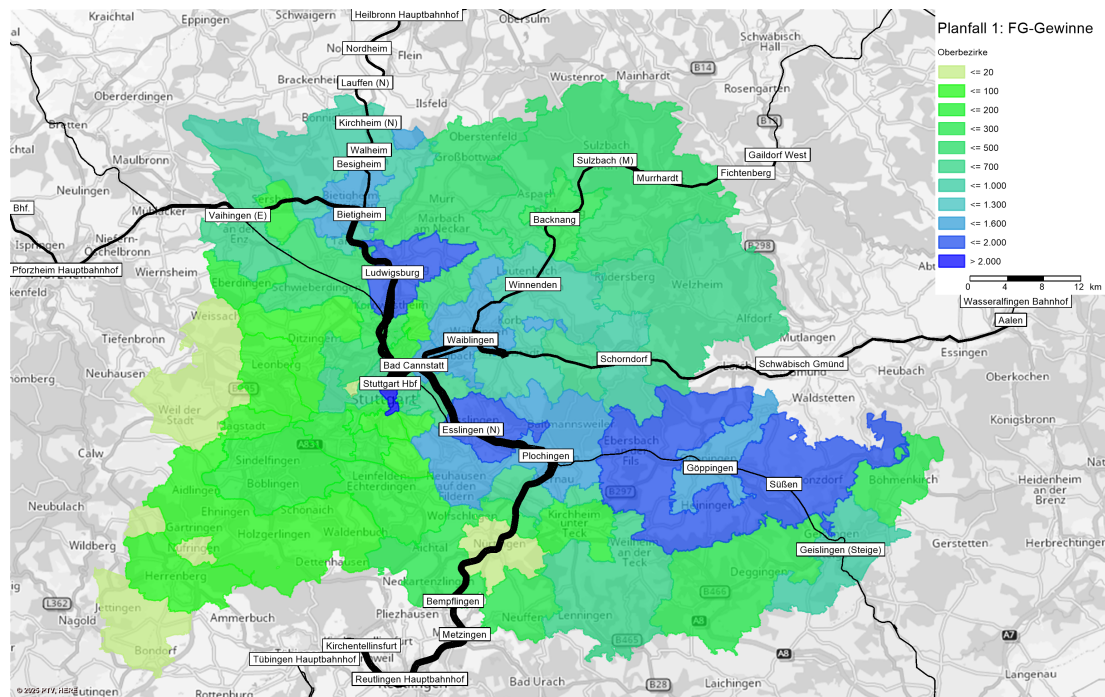


Abbildung 6.14: Planfall 1: Oberbezirke mit Fahrgastgewinnen

Planfall 2

Planfall 2 basiert auf dem RR -Wert von 2,7 aus der standardisierten Bewertung¹ und dem angepasste Fahrzeitparameter ($\beta_{\text{Fahrzeit,PF2}}$) von -0.0637683. Die Varianz der Reisezeit wird geringer als in Planfall 1 bewertet und die daraus resultierende Fahrgastanzahl ist 1.189.750. Ein Zuwachs von 20.921 Fahrgästen kann durch einen pünktlichen Betrieb generiert werden.

Die Analyse der Auswirkungen eines pünktlichen Betriebs auf die Verkehrsmittelwahl (siehe Abbildung 6.15) zeigt nur geringe Abweichungen gegenüber Planfall 1 (siehe Abbildung 6.13). Die stärkste Wirkung entfaltet sich – wie in Planfall 1 – auf der Relation Esslingen - Stuttgart mit über 500 Fahrgästen je Richtung. Für Ludwigsburg ergeben sich Zuwächse insbesondere auf den Relationen nach Bietigheim-Bissingen/Besigheim (insgesamt > 400 Fahrgäste) und Esslingen (> 300 Fahrgäste insgesamt). Von und nach Stuttgart zeigen sich Mehrnachfragen von über 200 Fahrgästen je Richtung auf den Relationen nach Waiblingen und Plochingen. Planfall 2 unterscheidet gegenüber Planfall 1 vor allem in der Höhe der Zuwächse. Sieben Relationen weisen über 200 Fahrgäste auf und 18 über 100. Die Relation Stuttgart–Schorndorf (Verflechtungsbereich) ist nicht mehr unter den 50 Beziehungen mit den höchsten Zuwächsen. Dafür sind auf der Beziehung Geislingen (Verflechtungsbereich)–Nürtingen (Verflechtungsbereich) 80 Fahrgäste hinzugekommen. Bei der Betrachtung der Fahrgastgewinne auf Ober-

¹in der Version 2016+

bezirksebene (siehe Abbildung 6.16) zeigen sich geringere Effekte im Vergleich zu Planfall 1. Esslingen und Stuttgart verzeichnen Fahrgastgewinne von über 1.500. Der Zuwachs an Fahrgästen in Ludwigsburg und im Mittelzentrum und Verflechtungsbereich von Göppingen ist etwas geringer als in Planfall 1 und beträgt mehr als 1.000. Für Ludwigsburg erklärt sich dies durch die weniger stark ausgeprägten Beziehungen Richtung Bietigheim-Bissingen/Besigheim (Mittelzentrum und Verflechtungsbereich). Im Mittelzentrum Göppingen sind die Beziehungen in den umliegenden Verflechtungsbereich und nach Stuttgart geringer. Die Zuwächse für Bietigheim-Bissingen/Besigheim (Mittelzentrum), Waiblingen (beide > 900), Plochingen (> 800 Fahrgäste) und Bad Cannstatt (> 700) fallen moderater aus. Aus der Umlegung ergibt sich für Planfall 2 eine Gesamtbeförderungsweite von 7.806.655 km. Sie steigt gegenüber dem Analysefall um 3,23 %. Die mittlere Beförderungsweite beträgt 10,7 km (+1,86 %). Die umgelegten ÖV-Personenfahrten summieren sich auf 727.567 (+1,3 %). Diese Werte sind geringer als in Planfall 1, da sich die Wirkungen der verbesserten Pünktlichkeit weniger stark auf die Verkehrsmittelwahl auswirken. Ähnlich wie in Planfall 1 steigt die Fahrtenzahl nur moderat, während die im ÖV länger ausfallen. Die Zuverlässigkeitsverbesserungen wirken sich auch in diesem Planfall auf die Wegelängen aus.

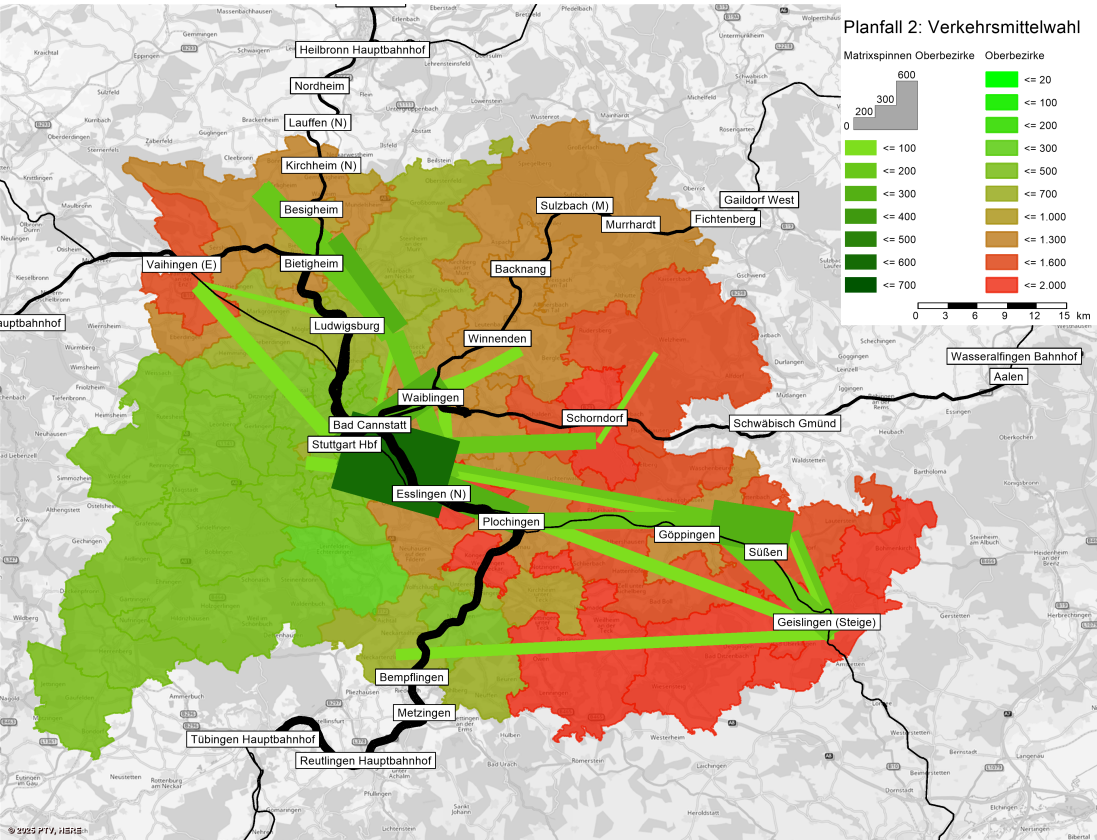


Abbildung 6.15: Planfall 2: Veränderung der Verkehrsmittelwahl aufgrund verbesserter Zuverlässigkeit

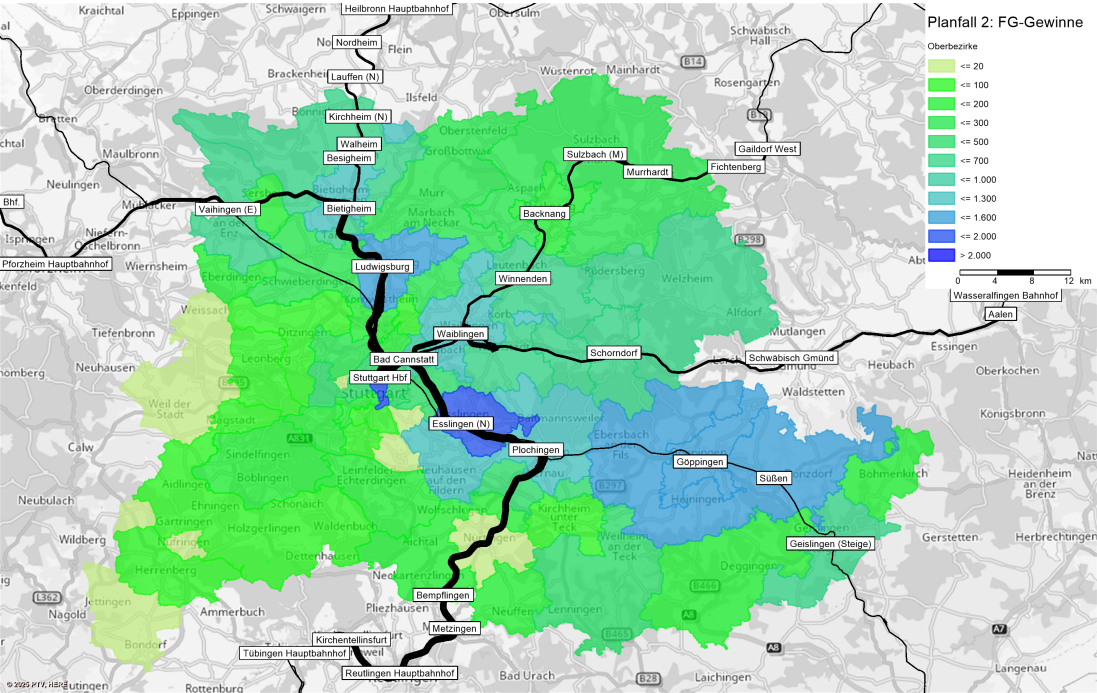


Abbildung 6.16: Planfall 2: Oberbezirke mit Fahrgastgewinnen

Planfall 3

Planfall 3 weist gemäß BVWP den niedrigsten RR -Wert von 1,0 auf. Der angepasste Fahrzeitparameter ($\beta_{\text{Fahrzeit,PF3}}$) beträgt -0,0647490. Die Reisezeitvarianz erhält die geringste Bewertung, damit ist die Fahrgastzahl mit 1.177.101 unter allen Planfällen am niedrigsten. Der Fahrgastzuwachs beläuft sich auf 8.275 Fahrgäste. Eine lineare Interpolation der Fahrgastanzahl für Planfall 3 basierend auf RR und den Fahrgastzahlen von Planfall 2 und 3 ergibt 1.178.357 Fahrgäste und weicht um 1.200 Fahrgäste von dem berechneten Wert ab. Dies deutet auf einen linearen Zusammenhang zwischen RR und Fahrgastanzahl hin. Die interpolierte Fahrgastzunahme von Planfall 3 ist 9.523 und zeigt eine deutliche Abweichung gegenüber dem berechneten Wert (8.275 Fahrgäste).

Planfall 3 zeigt eine deutliche Reduzierung der Effekte einer verbesserten Zuverlässigkeit. Die Relation Stuttgart - Esslingen ist die größte Relation und hat mehr als 200 Fahrgäste je Richtung. Danach kommt die Relation Göppingen Mittelzentrum und Göppingen Verflechtungsbereich mit über 100 Fahrgästen je Richtung. Alle weiteren Relation weisen weniger als 100 Fahrgäste auf. In der Abbildung 6.17 ist zu sehen, dass die meisten Relationen vergleichbare Fahrgastzahlen aufweisen. Auch bei den Oberbezirken mit Fahrgastzuwächsen zeigen sich nur noch schwache Effekte (siehe Abbildung 6.18). Die größten Fahrgastgewinne verzeichnen Esslingen, Stuttgart (beide > 600), Verflechtungsbereich von Göppingen, Ludwigsburg (beide > 500) und das Mittelzentrum Göppingen mit 400 zusätzlichen Fahrgästen. Weite Gebiete mit moderaten Gewinnen sind Bietigheim-Bissingen/Besigheim (Mittelzentrum), Plochingen, Waiblingen und Bad Cannstatt mit jeweils über 250 zusätzlichen Fahrgästen. Südwestlich sind mehrere Bezirke, die Fahrgastgewinne von unter 20 Personen aufweisen. Planfall 3 verzeichnet 7.660.346 km Gesamtbeförderungsweite (+1,26 % zum Analysenullfall), eine mittlere Beförderungsweite von 10,6 km (+0,74 %) und 719.970 ÖV-Fahrten (+0,53 %). Genauso wie in den Planfällen 1 und 2 ist das Muster eine leichte Zunahme der Personenfahrten bei verlängerten ÖV-Wegen, der Effekt verbesserter Zuverlässigkeit wirkt sich auch in diesem Planfall auf die Wegelängen aus.

Die Tabelle 6.3 fasst die Ergebnisse der drei Planfälle zusammen.

Planfälle	FG ¹	FG-Gewinne	Gesamt-beförderungsweite [km]	mittlere Beförderungsweite [km]	Anzahl ÖV-Personenfahrten
Planfall 1	1.196.452	27.626	7.884.522	10,8	731.590
Planfall 2	1.189.750	20.921	7.806.655	10,7	727.567
Planfall 3	1.177.101	8.275	7.660.346	10,6	719.970

Tabelle 6.3: Ergebnisse der drei Planfälle

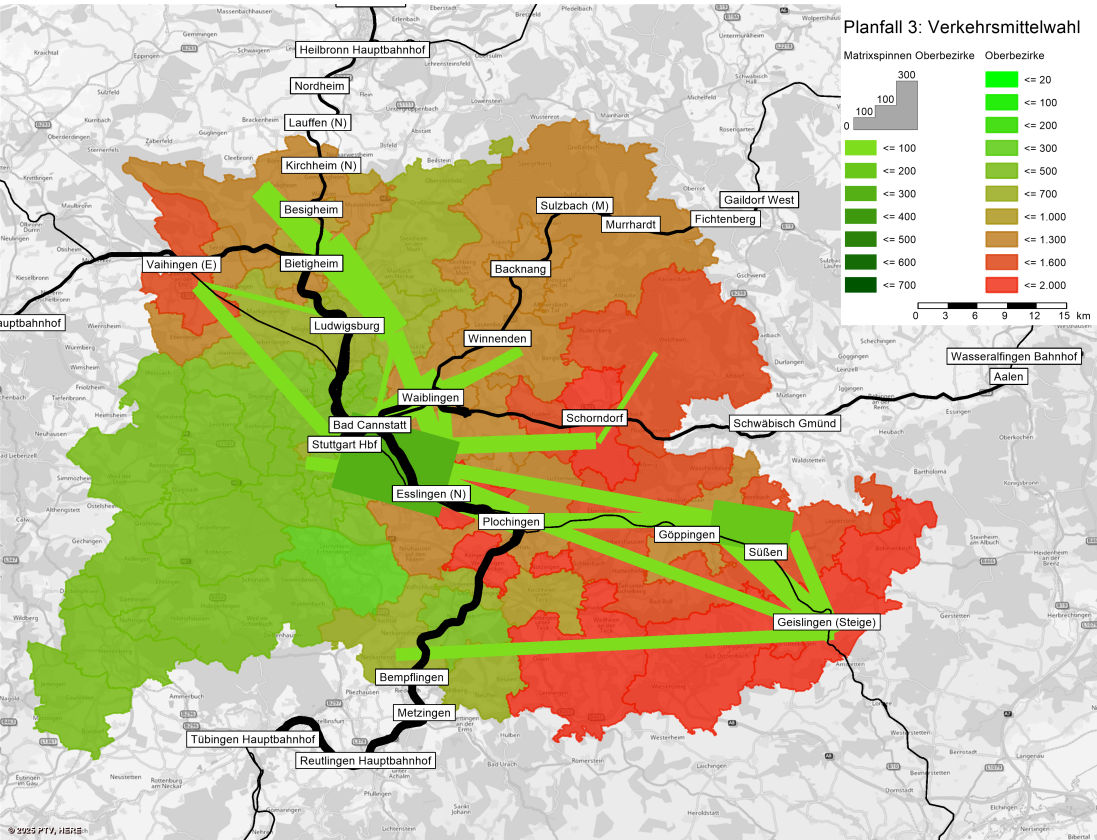


Abbildung 6.17: Planfall 3: Veränderung der Verkehrsmittelwahl aufgrund verbesserter Zuverlässigkeit

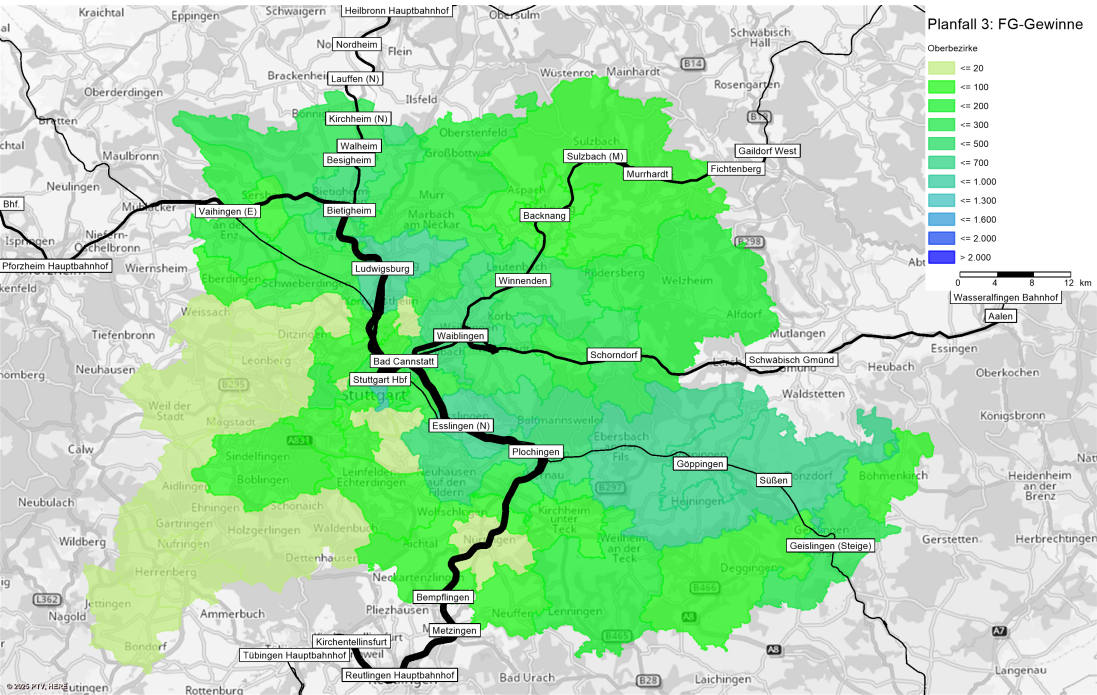


Abbildung 6.18: Planfall 3: Oberbezirke mit Fahrgastgewinnen

Verkehrsmittelwahl mit Verspätungswerten für alle schienengebundenen ÖV-Systeme

Die in der Auswertung genutzten Verspätungsdaten enthalten nur Regionalzüge. Die daraus berechneten Verspätungskennwerte konnten nur einem geringen Anteil an ÖV-Wege zugeordnet werden. So zeigt die Betrachtung des Anteils an ÖV-Linien mit Verspätungsdaten an den Gesamt-ÖV-Linien Potentiale für stärkere Effekte, wenn mehr Verspätungsdaten vorliegen würden. In der Umlegung der Planfälle werden im Mittel 113.114.858 ÖV-Teilwege umgelegt, die Abweichung der drei Planfälle von diesem Mittelwert liegt unter 0,0003 %. 57,40 % dieser Wege finden in schienengebundenen Verkehrssystemen (S-, Stadtbahn und Regional- und Fernverkehr) und 42,60 % in öffentlichen Nahverkehrs- und Regionalbussen statt. 5,64 % der gesamten ÖV-Teilwege werden in Regionalzügen durchgeführt für die Verspätungswerte vorliegen. Bei Betrachtung der ÖV-Wege im schienengebundenen Verkehr sind für 9,82 % aller Wege Verspätungswerte vorhanden. Um die Wirkung verbesserter Zuverlässigkeit für alle schienengebundenen Verkehrssysteme (Fern-, Regionalzugverkehr, S- und Stadtbahn) ungefähr abzuschätzen, wurden die Fahrplanfahrtelemente ohne Verspätungswerte mit einer pauschalen Verspätung von 2,25 Minuten belegt. Dieser Wert wurde gewählt, da er den Mittelwert über alle berechneten Zuglinien darstellt (siehe Kapitel 6.2). Anschließend wurde die Verkehrsmittelwahl analog zu Planfall 1 (siehe Kapitel 6.5) durchgeführt. Der RR -Wert beträgt 3,7; der verwendete Parameter für die Bewertung der mittleren Verspätung $\beta_{\text{mittlere_Verspätung}}$ ist -0,24198 und der angepasste Fahrzeitparameter ($\beta_{\text{Fahrzeit}} = -0.0180401$). Abbildung 6.19 zeigt die deutlichen Effekte der veränderten Verkehrsmittelwahl für den ganzen Modellraum. Durch Zuverlässigkeitsverbesserungen aufgrund der Reduzierung der Verspätung auf 0 Minuten auf allen Zugstrecken werden 988.172 zusätzliche Fahrgäste generiert. Die größten Gewinne betreffen die, unmittelbar an Stuttgart anschließenden, Oberbezirke: Filder, Stuttgart-Vaihingen, Esslingen, Bad Cannstatt und Böblingen (siehe Abbildung 6.20). Im Vergleich zu den Ergebnissen der Planfälle 1-3 sind die Nachfragegewinne stärker auf diese Bezirke konzentriert. Dies erklärt sich durch die hohe Nachfrage auf diesen Relationen. Das Modellierungsergebnis ist hinsichtlich seiner Aussagekraft kritisch zu reflektieren. Die Analyse der Ergebnisse der Linienverspätungen in Kapitel 6.2 beschreibt tageszeitliche Schwankungen, die Veränderung der Verspätung im Fahrtverlauf, Unterschiede zwischen den Verspätungswerten der Linien und infrastrukturelle Unterschiede der genutzten Trassen. Fraglich ist ferner, ob Verspätungen in der Stadtbahn mit eigener Infrastruktur genauso auftreten wie Verspätungen im Regionalverkehr, der im Mischverkehr mit dem Fernverkehr fährt. Das Modellergebnis zeigt vor allem Potentiale auf nachfragestarken Relationen durch eine verbesserte Zuverlässigkeit. Zudem ist die Verbesserung der Zuverlässigkeit eine Möglichkeit um den ÖV attraktiver zu gestalten und Fahrgastgewinne in der Fläche zu generieren.

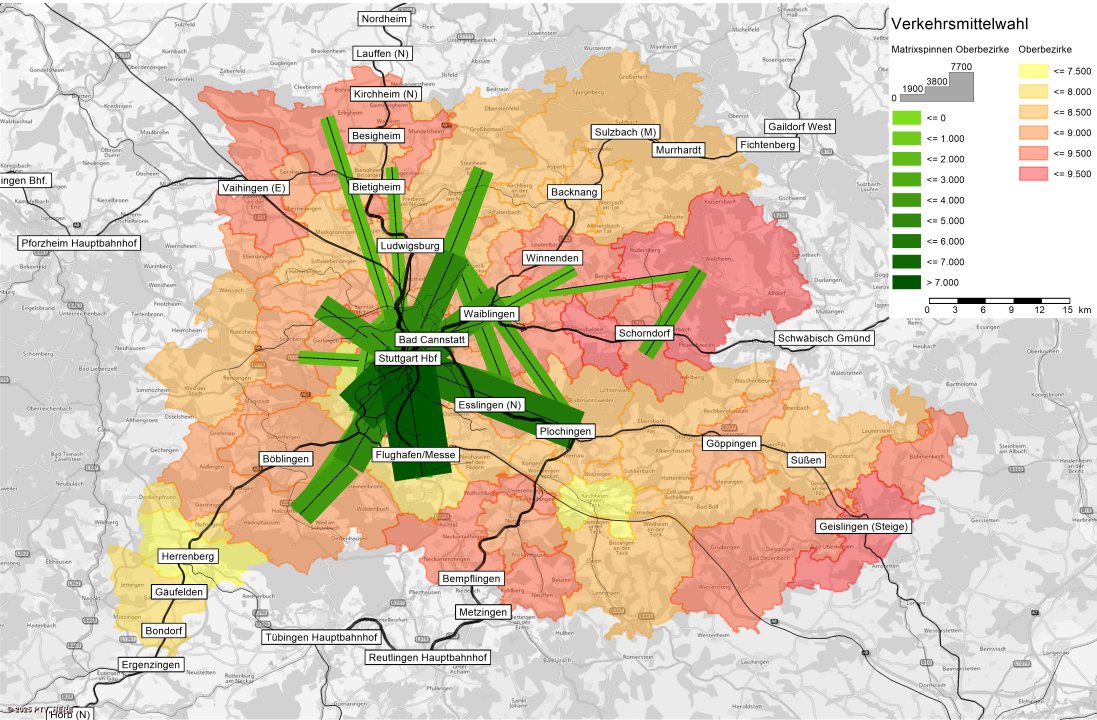


Abbildung 6.19: Veränderung der Verkehrsmittelwahl aufgrund verbesserter Zuverlässigkeit für alle Zuglinien

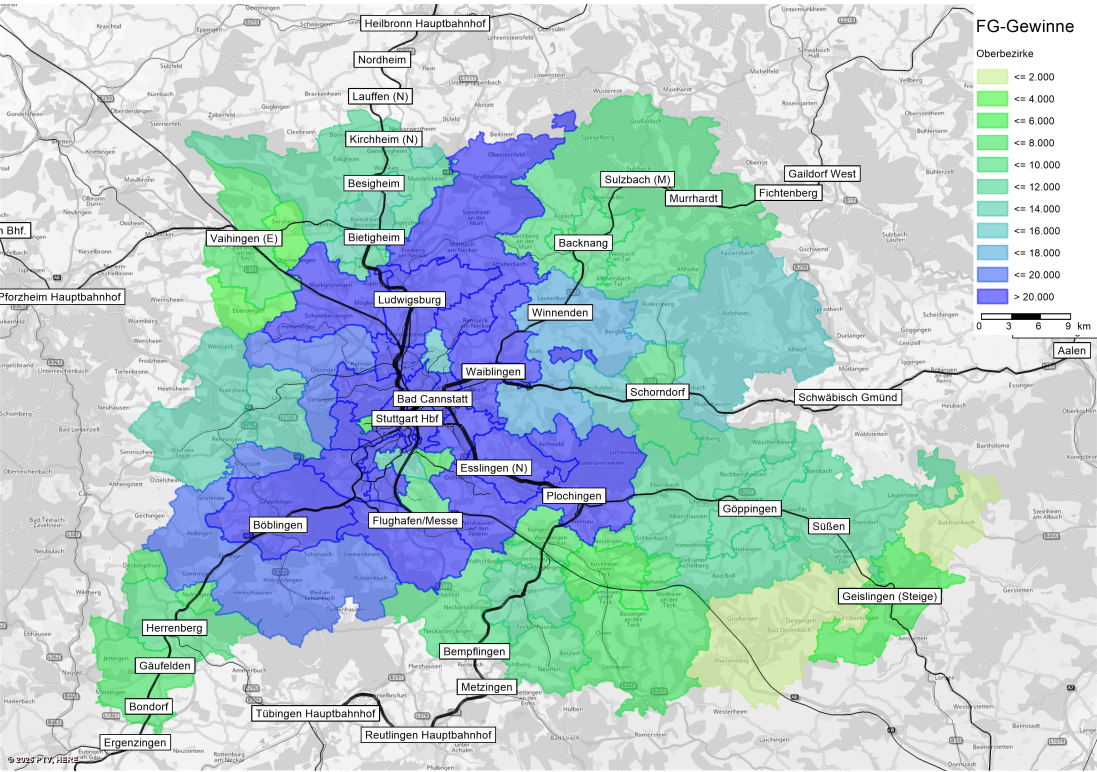


Abbildung 6.20: Fahrgastgewinne aufgrund verbesserter Zuverlässigkeit für alle Zuglinien

7 Fazit

Das Ziel der Masterarbeit ist den Einfluss der Reisezeitzuverlässigkeit auf die Verkehrsmittelwahl anhand eines makroskopischen Verkehrsnachfragemodells abzubilden. In diesem Kapitel werden die dafür verwendete Methodik und die Modellergebnisse kritisch hinterfragt und Verbesserungsmöglichkeiten erarbeitet. Zudem werden Limitierung der Forschungsarbeit hinsichtlich der Auswirkungen auf die Ergebnisse reflektiert. Das Kapitel 5 erläutert die umfangreichen Schritte der methodischen Herangehensweise. Zuerst wurden die Verspätungsdaten von Regionalzügen, GTFS-Angebotsdaten und das VRS-Modell harmonisiert und verknüpft. Zudem wurde die bestehende Nutzenfunktion des VRS-Modells um einen zusätzlichen Parameter und eine Kenngrößenmatrix erweitert. Der zusätzliche Parameter konnte nicht direkt aus der Parameterschätzung übernommen werden, sondern es bedurfte einer Anpassung an die bestehenden Parameter der Nutzenfunktion. Die ÖV-Kenngrößenmatrix *Mittlere_Verspätung* wurde durch zwei Methoden berechnet und die Ergebnisse beider Kenngrößenmatrizen bezüglich ihrer Aussagekraft verglichen. Eine weitere Entscheidung im Forschungsablauf betrifft die Formulierung der Nutzenfunktion der Analysenullfälle. Die berücksichtigten Verspätungen wurden durch einen positiven Faktor ausgeglichen. Dazu wurde der Analysenullfall 0 mit einer pauschalen Anhebung des ÖV-Grundnutzens und der Analysenullfall 1 mit einer Verringerung des Parameters der Fahrzeugfahrzeit gerechnet. Die Ergebnisse der beiden Analysenullfälle wurden durch einen Vergleich mit dem Basisfall plausibilisiert. Das Verfahren der Verringerung des Fahrzeitparameters des Analysenullfall 1 erwies sich dabei als vorteilhafter und zeigte in der Umlegung eine vergleichbare Beförderungweite wie der Basisfall. Eine Vereinfachung dieser Schritte könnte die Handhabbarkeit der Integration der Reisezeitzuverlässigkeit in ein Verkehrsnachfragemodell erheblich erleichtern und zu einer häufigeren Berücksichtigung führen. Ein Vorschlag hierzu ist, in der Modellerstellung Verspätungsdaten nachfrage- und angebotsseitig zu berücksichtigen und die Modelle anhand vorliegender Verspätungsdaten zu kalibrieren. Bestandsmodellen können so Nachfrageeffekte verbesserter Zuverlässigkeit einfach abbilden. Für die Berechnung von Nachfrageeffekten von verbesserten Verspätungswerten oder zukünftigen Maßnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit könnte es sich als sinnvoll erweisen eine Schnittstelle für die Integration von Verspätungsdaten in ein Verkehrsmodell zu schaffen. Vergleichbar zu den GTFS-Daten ist der Import von Verspätungsdaten zu standardisieren, um den Datenimport zu vereinfachen.

Inhaltlich zeigt das Ergebnis der Verkehrsmittelwahlmodellierung (Kapitel 5.5) die räumliche Verortung von Nachfragegewinnen aufgrund verbesserter Zuverlässigkeit. Dabei werden drei Szenarien mit unterschiedlicher Sensitivität bei der Bewertung der Reisezeitvariabilität betrachtet. Zusammenfassend zeigt sich, dass die größten Effekte auf nachfragestarken Beziehungen (siehe Abbildung 4.1) und Beziehungen mit einer hohen mittleren Verspätung entstehen (siehe Abbildung 6.12). So profitieren die Beziehungen Stuttgart–Esslingen und Göppingen Mittelzentrum–Göppingen Verflechtungsbereich sehr stark von den Zuverlässigkeitsverbesserungen. Entlang des MEX16 und im Korridor Kirchheim–Bietigheim–Bissingen–Esslingen werden ebenfalls viele Fahrgäste generiert. Moderate Effekte gibt es für die Relation Vaihingen (Enz)–Stuttgart und Stuttgart–Schorndorf (Mittelzentrum und Verflechtungsbereich). Beziehungen mit geringer Verspätung erzeugen hingegen weniger Fahrgastzugewinne. Dies zeigt sich in den Gebiete südwestlich und nordöstlich von Stuttgart. Stark verspäteten Relationen zeichnen sich durch keine oder nur eine geringe Überlagerung von Linien und einer Umstiegserfordernis aus. Die Umlegungskennziffern zeigen, dass Zuverlässigkeitsverbesserungen in längeren ÖV-Wegen resultieren.

Die Wirkungen der Verspätungen entfalten sich in den Basis- und Analysenullfällen nur für einen geringen Anteil an Wegen. So sind für 9,82 % aller ÖV-Wege im schienengebundenen Verkehr Verspätungswerte vorhanden. Selbiges gilt für die Wirkung von Zuverlässigkeitsverbesserungen in den Planfällen: Die Mehrheit der Wege findet ohne Berücksichtigung der Verbesserung der Zuverlässigkeit statt. Trotz dieser Einschränkung können deutliche Effekte quantifiziert werden und es ergeben sich belastbare Fahrgastzuwächse. Um mögliche Fahrgastgewinne für alle schienengebundene Verkehrssysteme abschätzen zu können, wurde ein pauschaler Verspätungswerte für die Haltestellenabschnitte ohne vorliegende Verspätungswerte angenommen. Die Implementierung von Verspätungswerten für alle ÖV-Systeme erzeugt deutlich stärkere Nachfrage im Vergleich zu den Planfalluntersuchungen, die nicht für alle ÖV-Systeme Verspätungswerte aufweisen. Eine Verbesserung der Zuverlässigkeit trägt zu einer starken Attraktivitätssteigerung des öffentlichen Verkehrs bei und zeigt sehr hohe Potentiale für die Region Stuttgart. Da es sich jedoch um eine näherungsweise Annahme der mittleren Verspätung für die übrigen Zuglinien handelt, sind die Ergebnisse kritisch einzuordnen. Die pauschale Belegung der Haltestellenabschnitte ohne Verspätungswerte mit einem Mittelwert steht im Gegensatz zu den Erkenntnissen aus der Analyse der Linienverspätungen.

Weiterhin fehlt die Betrachtung der Auswirkungen der Verspätungen auf die Umstiegsbeziehungen. Die Verspätungen sind statische Werte für die Fahrplanfahrtelemente und werden in der Umlegung nicht hinsichtlich der Wirkung auf Anschlussverbindungen berücksichtigt. Bei einem ÖV-Weg mit mehreren ÖV-Teilwegen (Verbindung mit Umstiegen) gibt es zwei potentielle Wirkungen von Verspätungen. Wenn die Verspätung auf dem ÖV-Teilweg vor dem Umstieg kleiner als die Gesamtumstiegszeit (Warte- +

und Gehzeit) des Umstieges ist, wird die Anschlussverbindung erreicht und die Gesamtverspätung ergibt sich nur aus der Verspätung des letzten Teilweges. Wenn die Verspätung jedoch größer als die Gesamtumstiegszeit ist, wird der Anschluss verpasst und die Gesamtverspätung erhöht sich um die Fahrzeugfolgezeit (Takt) der Anschlussverbindung. Diese zwei Szenarien können sowohl die Gesamtverspätung reduzieren als auch erhöhen. *PTV VISUM* ermöglicht die Berechnung des Verspätungsrisiko für Umstiegsverbindungen mithilfe des Verfahrensparameters *Verspätungsrisiko*. Dieser berechnet das erwartete Verspätungsrisiko und den verspäteten Anteil von Fahrgästen mithilfe der Wahrscheinlichkeit einer pünktlichen Ankunft $P_{\text{Pünktliche_Ankunft}}$ und der Exponentialverteilung der verspäteten Ankunft λ (PTV Group, 2025c). Das Verspätungsrisiko sollte in weiteren Untersuchungen hinsichtlich der Auswirkungen auf die Verkehrsmittelwahl betrachtet werden.

Für die verwendete Nutzenfunktion der Verkehrsmittelwahl war eine Anpassung des Parameters der Reisezeitzuverlässigkeit ($\beta_{\text{mittlere_Verspätung}}$) erforderlich, um deren Sensitivität adäquat abzubilden. Mangels eines eigenständigen Reisezeitparameters erfolgte die Kalibrierung über den Parameter der Fahrzeugfahrzeit (siehe Kapitel 6.5). Da die Gesamtreisezeit neben der Fahrzeugfahrzeit auch Zu-/Abgangs- und Wartezeiten umfasst und der Parameter damit nur für einen Teil der Gesamtreisezeit kalibriert wurde, ist in der Verkehrsmittelwahl von einer Verschiebung der Gesamtreisezeit und -weite auszugehen. Die Wirkung gilt es in der Bewertung der Ergebnisse zu beachten.

8 Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Integration der Reisezeitzuverlässigkeit in ein makroskopisches Verkehrsnachfragemodell ein aufwendiges, mehrstufiges Verfahren mit zahlreichen Bearbeitungs- und Verknüpfungsschritten ist. Trotz dieses erheblichen methodischen und datenbezogenen Aufwands konnten Verhaltenseffekte infolge einer verbesserten Zuverlässigkeit belastbar abgebildet werden. Damit leistet die Masterarbeit einen Beitrag zu einem besseren Verständnis für die Wirkung der Reisezeitzuverlässigkeit auf die Verkehrsmittelwahl und verdeutlicht, dass deren explizite Berücksichtigung für aussagekräftige Verkehrsmodelle unerlässlich ist.

Gleichzeitig wird weiterer Forschungsbedarf sichtbar. Vorrangig sind eine Vereinfachung des Verfahrens und eine stärkere Harmonisierung der Datengrundlagen erforderlich, um Implementierung und Handhabbarkeit der Zuverlässigkeitsbetrachtung zu verbessern. Zudem ist die Bereitstellung leicht integrierbarer Verspätungsdaten entscheidend, damit die relevanten Informationen ohne zusätzliche Aufbereitung in Entscheidungsmodelle einfließen können. Darauf aufbauend können weitere anwendungsorientierte Forschungsarbeiten Beiträge für eine optimierte Operationalisierung der Integration von Verspätungsdaten in Verkehrsnachfragemodelle sowie für die Aufbereitung umfangreicher Verspätungsdaten für verschiedene Verkehrssysteme bieten. Offen bleibt, wie in der Praxis mit erhöhter Unzuverlässigkeit umgegangen wird und welche Strategien Reisende entwickeln, um deren Auswirkungen zu begrenzen. Stellen ökonometrische Entscheidungsmodelle überhaupt ein geeignetes Mittel dar, um Zuverlässigkeitsaspekte adäquat abbilden zu können - oder wirkt Unzuverlässigkeit nicht vielmehr als faktisches Ausschlusskriterium für bestimmte Verkehrsmittel. Darüber hinaus stellt sich die Frage, welche weiteren Abwägungsprozesse bei der Bewertung der Zuverlässigkeit stattfinden. Personen, die auf öffentliche Verkehrsmittel angewiesen sind, reagieren auf hohe Verspätungswerte grundsätzlich anderes als Menschen mit verschiedenen Mobilitätswerkzeugen. Diese Punkte sollten in weiteren Forschungsarbeiten vertieft werden, um Entscheidungsprozesse im Hinblick auf Reisezeitzuverlässigkeit differenzierter abzubilden. Insgesamt zeigt die Arbeit verschiedene Aspekte des Einflusses der Reisezeitzuverlässigkeit auf die Verkehrsmittelwahl auf. Das langfristige Ziel sollte eine systematische Betrachtung dieser Aspekte in Verkehrsnachfragemodellen und Nutzen-Kosten-Untersuchungen sein.

A Anhang

A.1 Ausgewertete Regionalzüge

Linienname	Anzahl Haltestellen - Start - Zielhaltestelle
IRE1	10 - Aalen Hbf - Karlsruhe Hbf
IRE1	10 - Karlsruhe Hbf - Aalen Hbf
IRE1	11 - Karlsruhe Hbf - Aalen Hbf
IRE1	4 - Aalen Hbf - Stuttgart Hbf
IRE1	4 - Karlsruhe Hbf - Stuttgart Hbf
IRE1	4 - Stuttgart Hbf - Aalen Hbf
IRE1	4 - Stuttgart Hbf - Karlsruhe Hbf
IRE1	5 - Karlsruhe Hbf - Stuttgart Hbf
IRE1	5 - Stuttgart Hbf - Karlsruhe Hbf
IRE1	6 - Karlsruhe Hbf - Stuttgart Hbf
IRE1	6 - Stuttgart Hbf - Karlsruhe Hbf
IRE1	7 - Karlsruhe Hbf - Stuttgart Hbf
IRE1	7 - Stuttgart Hbf - Karlsruhe Hbf
IRE1	8 - Karlsruhe Hbf - Stuttgart Hbf
IRE1	8 - Stuttgart Hbf - Karlsruhe Hbf
IRE1	9 - Aalen Hbf - Karlsruhe Hbf
IRE1	9 - Karlsruhe Hbf - Aalen Hbf
IRE6	12 - Sigmaringen - Stuttgart Hbf
IRE6	12 - Stuttgart Hbf - Aulendorf
IRE6	13 - Aulendorf - Stuttgart Hbf
IRE6	14 - Aulendorf - Stuttgart Hbf
IRE6	14 - Stuttgart Hbf - Aulendorf
IRE6	16 - Stuttgart Hbf - Aulendorf
IRE6	17 - Stuttgart Hbf - Aulendorf
IRE6	3 - Stuttgart Hbf - Tübingen Hbf
IRE6	3 - Tübingen Hbf - Stuttgart Hbf
IRE6	5 - Stuttgart Hbf - Tübingen Hbf

Linienname	Anzahl Haltestellen - Start - Zielhaltestelle
IRE6	5 - Tübingen Hbf - Stuttgart Hbf
IRE6	15 - Aulendorf - Stuttgart Hbf
IRE6	16 - Stuttgart Hbf - Aulendorf
IRE6	5 - Stuttgart Hbf - Tübingen Hbf
IRE6	5 - Tübingen Hbf - Stuttgart Hbf
MEX12	12 - Ludwigsburg - Tübingen Hbf
MEX12	12 - Tübingen Hbf - Ludwigsburg
MEX12	19 - Heilbronn Hbf - Tübingen Hbf
MEX12	19 - Tübingen Hbf - Heilbronn Hbf
MEX12	25 - Mosbach-Neckarelz - Tübingen Hbf
MEX12	28 - Mosbach-Neckarelz - Tübingen Hbf
MEX12	29 - Tübingen Hbf - Mosbach-Neckarelz
MEX12	9 - Heilbronn Hbf - Stuttgart Hbf
MEX12	9 - Stuttgart Hbf - Heilbronn Hbf
MEX13	12 - Aalen Hbf - Stuttgart Hbf
MEX13	12 - Stuttgart Hbf - Aalen Hbf
MEX13	18 - Ellwangen - Stuttgart Hbf
MEX13	18 - Stuttgart Hbf - Ellwangen
MEX13	20 - Crailsheim - Stuttgart Hbf
MEX13	20 - Stuttgart Hbf - Crailsheim
MEX16	16 - Geislingen(Steige) - Stuttgart Hbf
MEX16	16 - Stuttgart Hbf - Geislingen(Steige)
MEX16	22 - Stuttgart Hbf - Ulm Hbf
MEX16	22 - Ulm Hbf - Stuttgart Hbf
MEX17a	12 - Bietigheim-Bissingen - Pforzheim Hbf
MEX17a	12 - Pforzheim Hbf - Bietigheim-Bissingen
MEX17a	14 - Pforzheim Hbf - Stuttgart Hbf
MEX17a	14 - Stuttgart Hbf - Pforzheim Hbf
MEX17a	17 - Karlsruhe Hbf - Stuttgart Hbf
MEX17a	17 - Stuttgart Hbf - Karlsruhe Hbf
MEX17c	10 - Bretten - Bruchsal
MEX17c	10 - Bruchsal - Bretten
MEX17c	17 - Bruchsal - Mühlacker
MEX17c	17 - Mühlacker - Bruchsal
MEX17c	18 - Bruchsal - Stuttgart Hbf
MEX17c	26 - Bruchsal - Stuttgart Hbf

Linienname	Anzahl Haltestellen - Start - Zielhaltestelle
MEX17c	26 - Stuttgart Hbf - Bruchsal
MEX18	11 - Gaildorf West - Stuttgart Hbf
MEX18	11 - Stuttgart Hbf - Gaildorf West
MEX18	19 - Heilbronn Hbf - Tübingen Hbf
MEX18	19 - Tübingen Hbf - Heilbronn Hbf
MEX18	30 - Osterburken - Tübingen Hbf
MEX18	30 - Tübingen Hbf - Osterburken
MEX18	31 - Osterburken - Tübingen Hbf
MEX18	31 - Tübingen Hbf - Osterburken
MEX18	32 - Osterburken - Tübingen Hbf
MEX18	32 - Tübingen Hbf - Osterburken
MEX18	33 - Osterburken - Tübingen Hbf
MEX18	33 - Tübingen Hbf - Osterburken
MEX19	11 - Gaildorf West - Stuttgart Hbf
MEX19	11 - Stuttgart Hbf - Gaildorf West
MEX19	9 - Fornsbach - Stuttgart Hbf
MEX19	9 - Stuttgart Hbf - Fornsbach
MEX90	10 - Gaildorf West - Stuttgart Hbf
MEX90	10 - Stuttgart Hbf - Gaildorf West
MEX90	11 - Gaildorf West - Stuttgart Hbf
MEX90	11 - Stuttgart Hbf - Gaildorf West
MEX90	3 - Crailsheim - Schwäbisch Hall-Hessental
MEX90	3 - Schwäbisch Hall-Hessental - Crailsheim
MEX90	4 - Crailsheim - Stuttgart Hbf
MEX90	4 - Stuttgart Hbf - Crailsheim
MEX90	8 - Murrhardt - Stuttgart Hbf
MEX90	8 - Stuttgart Hbf - Murrhardt
MEX90	9 - Gaildorf West - Stuttgart Hbf
MEX90	9 - Stuttgart Hbf - Gaildorf West
RB14a	11 - Stuttgart Hbf - Rottweil
RB14a	3 - Bondorf(b Herrenberg) - Herrenberg
RB14a	3 - Herrenberg - Bondorf(b Herrenberg)
RB14a	5 - Herrenberg - Eutingen im Gäu
RB14a	6 - Herrenberg - Horb

Linienname	Anzahl Haltestellen - Start - Zielhaltestelle
RB14a	8 - Stuttgart Hbf - Horb
RB6	3 - Stuttgart Hbf - Tübingen Hbf
RB6	3 - Tübingen Hbf - Stuttgart Hbf
RE90	11 - Gaildorf West - Stuttgart Hbf
RE90	11 - Stuttgart Hbf - Gaildorf West
RE90	9 - Gaildorf West - Stuttgart Hbf
RE90	9 - Stuttgart Hbf - Gaildorf West

Tabelle A.1: Ausgewertete Regionalzugnummern und Fahrtverläufe

A.2 GTFS-Datensatz der NVBW

Notwendigkeit	Text-Datei	Informationen
Obligatorisch	<i>agency.txt</i>	ID des Verkehrsunternehmens (<i>agency_id</i>) Name des Verkehrsunternehmens (<i>agency_name</i>) Website des Verkehrsunternehmens (<i>agency_url</i>) Zeitzone des Verkehrsunternehmens (<i>agency_timezone</i>)
Obligatorisch	<i>calendar.txt</i>	ID des Verkehrstagprofils (<i>service_id</i>) Verkehrstage (<i>monday–sunday</i>) Fahrplanperiode (<i>start_date, end_date</i>)
Fakultativ	<i>calendar_dates.txt</i> (<i>abweichende Fahrplantage</i>)	ID des Verkehrstagprofils (<i>service_id</i>) Datum (<i>date</i>) Bestimmung der Ausnahme (<i>exception_type</i>)

Notwendigkeit	Text-Datei	Informationen
Obligatorisch	<i>stops.txt</i>	ID der Haltestelle (<i>stop_id</i>) Name der Haltestelle (<i>stop_name</i>) Geographischer Breitengrad (<i>stop_lat</i>) Geographischer Längengrad (<i>stop_lon</i>) Übergeordnete Haltestelle (<i>parent_station</i>) Mobilitätshilfen (<i>wheelchair_boarding</i>) Bahnsteignummer (<i>platform_code</i>)
Obligatorisch	<i>routes.txt</i>	ID der Linienroute (<i>stop_id</i>) ID des Verkehrsunternehmens (<i>agency_id</i>) Liniennummer (<i>route_short_name</i>) Linienverlauf (<i>route_long_name</i>) Verkehrssystem (<i>route_types</i>)
Obligatorisch	<i>stop_times.txt</i>	ID des Fahrzeitprofils (<i>stop_id</i>) Ankunftszeit (<i>arrival_time</i>) Abfahrtszeit (<i>departure_time</i>) ID der angefahrenen Haltestelle (<i>stop_id</i>) Abschnittsendhaltestelle (<i>stop_headsign</i>) Besonderheiten der Haltestelle (z.B. Anrufsammeltaxihaltestellen, Bedarfshalte) (<i>pickup_type</i> bzw. <i>drop_off_type</i>) Zurückgelegte Entfernung (<i>shape_dist_traveled</i>)

Notwendigkeit	Text-Datei	Informationen
Obligatorisch	<i>trips.txt</i>	ID der Linienroute (<i>route_id</i>) ID des Verkehrstagsprofils (<i>service_id</i>) ID der Fahrplanfahrt (<i>trip_id</i>) ID der räumlichen Verortung (<i>shape_id</i>) Endhaltestelle der Fahrplanfahrt (<i>trip_headsign</i>) Name der Fahrplanfahrt (<i>trip_short_name</i>) Fahrtrichtung (<i>direction_id</i>) ID der Umlaufplanfahrt (<i>block_id</i>) Einstiegsmöglichkeit mit einem Rollstuhl (<i>wheelchair_accessible</i>)
Fakulativ	<i>shapes.txt</i>	ID der räumlichen Verortung (<i>shape_id</i>) Rutenpunktsequenz (<i>shape_pt_sequence</i>) Breitengrad des Rutenpunktes (<i>shape_pt_lat</i>) Längengrad des Rutenpunktes (<i>shape_pt_lon</i>) Zurückgelegte Entfernung (<i>shape_dist_traveled</i>)
Fakulativ	<i>feed_info.txt</i>	Name des Datenbereitstellers (<i>feed_publisher_name</i>) Website des Datenbereitstellers (<i>feed_publisher_url</i>) Sprache (<i>feed_lang</i>) Beginn der Datenbereitstellung (<i>feed_start_date</i>) Ende der Datenbereitstellung (<i>feed_end_date</i>) Datum der Datenbereitstellung (<i>feed_version</i>)

Notwendigkeit	Text-Datei	Informationen
Fakulativ	<i>transfers.txt</i>	Von Haltestelle (<i>from_stop_id</i>) Zu Haltestelle (<i>to_stop_id</i>) Art des Umstiegs (<i>transfer_type</i>) Mindestumstiegszeit (<i>min_transfer_time</i>)

Tabelle A.2: Übersicht über die GTFS-Textdateien und deren Informationen

Literaturverzeichnis

- Axhausen, K. W., Ehreke, I., Glemser, A., Hess, S., Jödden, C., Nagel, K., Sauer, A., & Weis, C. (2014, März). *Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf Basis der Schätzung eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung: FE-Projekt 96.996/2011 Zeitkosten Personenverkehr. Entwurf Schlussbericht* (Techn. Ber.) (Artwork Size: 351 p. Medium: application/pdf). ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000089615>
- Bates, J., Polak, J., Jones, P., & Cook, A. (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37(2-3), 191–229. [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(00\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(00)00011-9)
- Budras, C. (2025). Bis 2029 sollen 70 Prozent der Züge pünktlich kommen. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/auto-verkehr/patrick-schnieder-korrigiert-puenktlichkeitsziel-bei-der-bahn-soll-realismus-einkehren-accg-110697319.html>
- Carrion, C., & Levinson, D. (2012). Value of travel time reliability: A review of current evidence. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(4), 720–741. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.01.003>
- Cats, O. (2014). Regularity-driven bus operation: Principles, implementation and business models. *Transport Policy*, 36, 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.09.002>
- Dahl, D. A., Kindl, A., Walther, P. D. C., Paufler-Mann, D., Roos, A., Waßmuth, D. V., Weinstock, F., Röhling, D. W., & Mann, H.-U. (2016, Juli). *Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030*.
- DB Fernverkehr AG. (n. d.). Elektronisches Kursbuch der Deutschen Bahn. <https://kursbuch.bahn.de/hafas/kbview.exe>
- Dixit, M., Brands, T., Van Oort, N., Cats, O., & Hoogendoorn, S. (2019). Passenger Travel Time Reliability for Multimodal Public Transport Journeys. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(2), 149–160. <https://doi.org/10.1177/0361198118825459>
- Dubernet, I., & Axhausen, K. W. (2020). The German value of time and value of reliability study: the survey work. *Transportation*, 47(3), 1477–1513. <https://doi.org/10.1007/s11116-019-10052-4>

- Dugge, B. (2006, April). *Ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell* [Diss., Technische Universität Dresden]. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:swb:14-1162994071370-87705>
- Gaver, D. P. (1968). Headstart Strategies for Combating Congestion. *Transportation Science*, 2(2), 172–181. <https://doi.org/10.1287/trsc.2.2.172>
- Ghader, S., Darzi, A., & Zhang, L. (2019). Modeling effects of travel time reliability on mode choice using cumulative prospect theory. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 108, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.09.014>
- Google Ireland Limited. (2024, Oktober). Example GTFS Feed. <https://developers.google.com/transit/gtfs/examples/gtfs-feed#transferstxt>
- Hollander, Y. (2006). Direct versus indirect models for the effects of unreliability. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(9), 699–711. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.12.007>
- Intraplan Consult GmbH & Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH. (2023, März). Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im öffentlichen Personennahverkehr Version 2016+. https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/standardisierte-bewertung-2016plus-verfahrensanleitung.pdf?__blob=publicationFile
- Jackson, W. B., & Jucker, J. V. (1982). An Empirical Study of Travel Time Variability and Travel Choice Behavior [Publisher: INFORMS]. *Transportation Science*, 16(4), 460–475. Verfügbar 29. Mai 2025 unter <http://www.jstor.org/stable/25768067>
- Keller, K. (2014, September). *Modellierung und Optimierung des Verkehrsablaufs in Evakuierungssituationen* [Diss., Inst. für Straßen- und Verkehrswesen].
- Klinkhardt, C., Kandler, K., Kagerbauer, M., & Vortisch, P. (2025, März). *Reliability of Public Transportation Systems with Autonomous First-/Last-Mile Services in a Stated Mode Choice Experiment*.
- Klinkhardt, C., Kandler, K., Kistorz, N., Heilig, M., Kagerbauer, M., & Vortisch, P. (2024). Integrating Autonomous Busses as Door-to-Door and First-/Last-Mile Service into Public Transport: Findings from a Stated Choice Experiment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2678(2), 605–619. <https://doi.org/10.1177/03611981231175900>
- König, A., Axhausen, K. W., & Abay, G. (2004, Februar). *Zeitkostenansätze im Personenverkehr* (Forschungsbericht Nr. FB1065). Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) ETH Zürich. Zürich. <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/201-300/ab264.pdf>
- Kouwenhoven, M., De Jong, G. C., Koster, P., Van Den Berg, V. A., Verhoef, E. T., Bates, J., & Warffemius, P. M. (2014). New values of time and reliability in passenger transport in The Netherlands. *Research in Transportation Economics*, 47, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.017>
- Lampe, G. (2025, April). Dauerverspätung im Regionalverkehr.

- Li, H., Gao, K., & Tu, H. (2017). Variations in mode-specific valuations of travel time reliability and in-vehicle crowding: Implications for demand estimation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 103, 250–263. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.06.009>
- Lohse, D., & Schnabel, W. (2011). Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. 2: Verkehrsplanung [Num Pages: 631]. Beuth [u.a.]
- Nash, A. N., & Hille, S. J. (1968). *Public Attitudes Toward Transport Modes: A Summary of Two Pilot Studies*.
- NVBW – Nahverkehrsgesellschaft Baden–Württemberg mbH. (2024). *Bericht über den Schienenpersonennahverkehr in Baden–Württemberg 2024* (Jährlicher Auftraggeberbericht). Stuttgart.
- NVBW Open Data. (2025, September). Soll-Fahrplandaten Baden–Württemberg. <https://mobidata-bw.de/dataset/soll-fahrplandaten-baden-wuerttemberg>
- Oort, N. V., Brands, T., Romph, E. D., & Flores, J. A. (2015). Unreliability effects in public transport modelling. *International Journal of Transportation*, 3(1), 113–130. <https://doi.org/10.14257/ijt.2015.3.1.08>
- Ortúzar S., J. d. D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport* (4th ed). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781119993308>
- Paulhus, D. L. (1991). Measurement and Control of Response Bias. In *Measures of Personality and Social Psychological Attitudes* (S. 17–59). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-590241-0.50006-X>
- Pinkofsky, L. (2005, Oktober). *Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage* [Diss., Technische Universität Braunschweig]. https://leopard.tu-braunschweig.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbbs_derivate_00000047/Document.pdf
- PTV Group. (2025a). Hilfe zu PTV Visum. Fahrplanfeine Umlegung.
- PTV Group. (2025b). Hilfe zu PTV Visum. Kombinierte VISEM-Verkehrsverteilung/Moduswahl.
- PTV Group. (2025c). Hilfe zu PTV Visum. Moduswahl.
- PTV Group. (2025d). Hilfe zu PTV Visum. Verfahrensparameter Verspätungsrisiko.
- Quadrelli, R., Rouquette, C., Carvalho, A., Cöent, N., Draghi, N., Guyon, J., Jung, B., Mattion, M., Taghavi-Moharamli, P., & Papadimoulis, F. (2020, Juli). *World Energy Balances Overview* (Statistics report). International Energy Agency. Paris.
- Schlaich, J. D., Pohlner, R., & Heidl, U. (2012, März). *Verkehrsmodellierung für die Region Stuttgart Analyseverkehr 2009/2010* (Schlussbericht Modellierung). PTV AG. Karlsruhe.
- Schubert, J. (n. d.). Zugfinder. <https://www.zugfinder.net/de/start>

- Swierstra, A. B., Nes, R. V., & Molin, E. J. (2017). Modelling travel time reliability in public transport route choice behaviour. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. <https://doi.org/10.18757/EJTIR.2017.17.2.3194>
- Train, K. E. (2001, Januar). *Discrete Choice Methods with Simulation* (2. Aufl.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805271>
- Treiber, M. D. (2023). *Verkehrsökonomie für Bachelor-Studierende* (Vorlesungsskript). https://mtreiber.de/Vkoek_Ba_Skript/Verkehrsoekonomie_BA.pdf
- Tritschler, S., & Biechele, M. (2020, März). *Fortschreibung des VRS-Verkehrsmodells auf den Prognosehorizont 2030* (Modelldokumentation Nr. 278 / Version 3). VWI Stuttgart GmbH. Stuttgart.
- Umweltbundesamt. (n. d.). Emissionen des Verkehrs. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#verkehr-belastet-luft-und-klimaminderungsziele-der-bundesregierung>
- Van Loon, R., Rietveld, P., & Brons, M. (2011). Travel-time reliability impacts on railway passenger demand: a revealed preference analysis. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 917–925. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.11.009>
- Wikipedia Foundation, Inc. (n. d.). General Transit Feed Specification. https://de.wikipedia.org/wiki/General_Transit_Feed_Specification

Glossar

4-Stufen-Schema Das 4-Stufen-Schema ist das klassische Modell der Verkehrsplanung und wird auch Vierstufenmodell genannt. Es besteht aus den Nachfragestufen: Erzeugung, Verteilung, Aufteilung und der Angebotsstufe Umlegung. Die Verkehrserzeugung wird durch die Aktivitätenwahl bestimmt: Welche Aktivitäten finden an einem Tag statt und erzeugen die aus- und einfließende Verkehrsströme der Bezirke. Durch die Zielwahl wird auf Basis dieser Verkehrsströme berechnet, wie sich der Verkehr auf die Wege zwischen den Bezirken verteilt. Die Verkehrsmittelwahl berechnet für jede Quelle-Ziel-Relation die Aufteilung auf die Verkehrsmittel. Die Umlegung bestimmt durch die Routenwahl die konkrete Route der Wege zwischen den Quell- und Zielbezirken mit einem Verkehrsmittel. Das Ergebnis kann aufgrund von Streckenüberlastungen und veränderten Reisezeiten wiederum rückwirkend die Zielwahl beeinflussen.

Beförderungsweite Zurückgelegte Entfernung vom Starthaltepunkt zum Zielhaltepunkt. $\text{Beförderungsweite} = \text{Fahrtweite} + \text{Gehweite}$. Die Gesamtbeförderungsweite stellt die Summe der zurückgelegten Entfernung aller ÖV-Fahrten dar. Die mittlere Beförderungsweite teilt die Gesamtbeförderungsweite durch die Anzahl an ÖV-Fahrten. *PTV VISUM*-Kenngröße der Länge.

centrality-dispersion approach Konzept zu Modellierung von Verkehrsentscheidungen unter Beachtung der Reisezeitvariabilität: Reisende betrachten ein Zentralmaß (z.B. arithmetisches Mittel, Median) und ein Streuungsmaß (z.B. Varianz, Standardabweichung, Variationsweite) der Reisezeit in ihrer Wahlentscheidung. Unterkategorien sind der *mean-variance approach* und der *mean-dispersion approach*.

Dichtefunktion Die Dichtefunktion beschreibt die Wahrscheinlichkeitsverteilung von stetigen Variablen.

European Train Control System (ETCS) ETCS stellt ein europäisches Zugbeeinflussungssystem dar, welches die nationalen Zugsicherungssysteme ablöst und zur Harmonisierung des europäischen Eisenbahnverkehrs beiträgt. Ziel ist die technischen Systeme zur Fahrstrecken- und Abstandssicherung von der Infrastruktur

auf das Fahrzeug zu verlagern und durch kleinteiligere Streckenabschnitte die Streckenkapazität zu erhöhen.

Fahrplanfahrt Eine Fahrplanfahrt eines Verkehrsmittels wird nach einem zuvor festgelegten Fahrplan durchgeführt wird. Sie ist durch die Angaben im Fahrplan (wie Abfahrts- und Ankunftszeiten, Bahnhöfe/Haltestellen und Zugnummer) definiert und wird im öffentlichen Personen- oder Güterverkehr genutzt.

Fahrplanfahrtelement Haltestellenabschnitt einer Fahrplanfahrt.

Fahrpreis Fahrpreis für die Fahrt zwischen einem Quellbezirk und einem Zielbezirk. *PTV VISUM* Monetäre Kenngröße.

Fahrzeit im Fahrzeug Fahrzeit mit ÖV-Linie einschließlich Zwischenhaltezeiten. *PTV VISUM*-Kenngröße der Zeit.

Geoinformationssystem (GIS) Ein Geoinformationssystem dient zur Erfassung, Speicherung, Analyse, Verwaltung und Darstellung von raumbezogenen Daten (Geodaten). Es ermöglicht die Verknüpfung von Geodaten mit anderen Informationsquellen und wird für vielfältige Anwendungen in der Stadt-, Umwelt- und Verkehrsplanung verwendet. Die Abbildung und Analyse raumbezogener Daten wird durch die Georeferenzierung vereinfacht.

Kursbuch Ein Kursbuch enthält Fahrpläne und weitere Informationen zu Zugverbindungen. Es dient Fahrgästen und Personal als Orientierungshilfe für Abfahrts- und Ankunftszeiten, Linienführungen sowie gegebenenfalls ergänzende Hinweise zum Betrieb und informiert über Neuerungen wie die Einführung neuer Linien, Taktverdichtungen oder sonstige Angebotsänderungen .

Linienroute Eine Fahrplanfahrt folgt einer bestimmten Abfolge von Haltestellen auf einer fest definierten Strecke. Dies wird als Linienroute bezeichnet.

Logit-Modell Das Logit-Modell gehört zu den diskreten Wahlmodellen. Diese Modelle gehen davon aus, dass Individuen zwischen klar abgegrenzten Alternativen entscheiden müssen, ohne Anteile mehrerer Alternativen kombinieren zu können. Grundlage ist die Annahme, dass die Nutzenden ihren Nutzen maximieren, indem sie die Alternative k mit dem höchsten Nutzen U wählen. Der Nutzen einer Alternative U_k setzt sich aus einem deterministischen Bestandteil V_k und einem zufälligen Störterm ε_k zusammen. Auf dieser Basis lässt sich die Wahrscheinlichkeit bestimmen, mit der eine bestimmte Alternative gewählt wird.

Luftlinienweite Luftlinienentfernung zwischen Quell- und Zielbezirk. *PTV VISUM*-Kenngröße der Länge.

mean-variance approach Konzept zu Modellierung von Verkehrsentscheidungen unter Beachtung der Reisezeitvariabilität: Reisende betrachten die mittlere Reisezeit

(*mean*) und die Varianz der Reisezeit (*variance*) in ihrer Wahlentscheidung. Unterkategorie des *Centrality-Dispersion-Approaches*.

Mittelzentrum Das System der "Zentralen Orte" dient der Versorgung der Menschen im Einzugsgebiet mit den notwendigen Einrichtungen des Alltags. Diese Orte unterscheiden sich hinsichtlich Größe, Angebot und räumliches Einzugsgebiet und werden in Grund-, Mittel und Oberzentren eingeteilt. In Baden-Württemberg bündeln Mittelzentren ein Angebot an höherwertigen Einrichtungen und Arbeitsplätzen und dienen dem gehobenen, spezialisierten Bedarf.

Programmiersprache R R ist eine statistisch orientierte Programmiersprache zur Verarbeitung, Analyse und Visualisierung von Daten. Sie bietet eine breite Palette an Funktionen für statistische Berechnungen, maschinelles Lernen und grafische Darstellungen und wird insbesondere in Forschung, Data Science und angewandten Ingenieurwissenschaften eingesetzt. Sie wird häufig in der Entwicklungsumgebung R Studio verwendet.

Reliability Buffer Time Indikator zur Bestimmung der Reisezeitvariabilität. Differenz zwischen einem extremen N -ten Quantil der Reisezeit und der mittleren Reisezeit, welche Reisende in ihrer Wahlentscheidung berücksichtigen.

Schiefe Schiefe beschreibt die Ausprägung einer Asymmetrie einer Wahrscheinlichkeitsverteilung und kann beliebige Werte annehmen. Linksschiefe (oder rechtsschiefe) Verteilungen weisen negative Schiefe auf, rechtsschiefe (oder linkssteile) Verteilungen positive. Jede nicht-symmetrische Verteilung ist schief. Für symmetrische Verteilung gilt $\gamma_m = 0$. Bei linksschiefen Verteilungen sind die häufigsten Werte rechts vom Mittelwert, bei rechtsschiefen Verteilungen sind die meisten links.

Shape-Datei Eine Shape-Datei ist ein gängiges Datenformat für Vektordaten in Geoinformationssystemen, das Geometrien (Punkte, Linien, Polygone) und zugehörige Attributdaten in Tabellen speichert. Eine einzelne Shape-Datei besteht aus mehreren Dateien mit demselben Namen, welche obligatorisch die Geometrie (*.shp-file*), den Index (*.shx-file*) und die Attributdaten (*.dbf-file*) enthalten.

Standardisierte Bewertung Die Standardisierte Bewertung von Verkehrsweegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs, kurz Standardisierte Bewertung oder Standi stellt eine Entscheidungsgrundlage für den Einsatz öffentlicher Investitionsmittel nach dem Gesetz über Finanzhilfen des Bundes zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse der Gemeinden (Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG)) dar, um die Beurteilung von örtlich, technisch und verkehrlich unterschiedlichen Vorhaben nach gleichen Maßstäben zu vereinheitlichen und eine allgemeingültige Verfahrensanleitung zur Verfügung zu stellen. Die Bewertung nach dieser Verfahrensanleitung dient dem Nachweis der Gesamtwirtschaftlich-

keit und der Förderwürdigkeit von Vorhaben nach dem GVFG. Die aktuellste Version 2016+ wurde durch die Arbeitsgemeinschaft Intraplan Consult GmbH / Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr im Rahmen eines Forschungsprojekts erstellt.

Umsteigehäufigkeit Anzahl Umsteigevorgänge zwischen Start- und Zielhaltepunkt (je Verbindung). *PTV VISUM*-Kenngröße der Häufigkeit.

Verflechtungsbereich In Deutschland wird die Raumordnung durch das System der "Zentralen Orte" bestimmt. Diese zentralen Orte bündeln die notwendigen Einrichtung des Alltags an gut erreichbaren Orten, um ausgeglichene soziale und wirtschaftliche Verhältnisse in der Fläche zu gewährleisten. Diese Orte unterscheiden sich hinsichtlich Größe, Angebot und räumliches Einzugsgebiet. Das Einzugsgebiet wird durch das jeweilige Zentrum versorgt und als Verflechtungsbereich bezeichnet. Die Zentren sind für diesen Bereich zuständig. In der Raumplanung besteht das System der zentralen Orte aus Grund-, Mittel und Oberzentren mit entsprechend großen Verflechtungsbereichen.

Verkehrsnachfragemodell Modell zur Abschätzung des räumlichen und zeitlichen Verkehrsaufkommens und Prognose der verkehrlichen Wirkung von geplanten Maßnahmen.

Wahrscheinlichkeitsverteilung Eine Wahrscheinlichkeitsverteilung ist eine mathematische Abbildung, die jedem möglichen Ergebnis eines Zufallsexperiments eine Wahrscheinlichkeit zuordnet. Auf der x-Achse stehen die Ausprägungen der Zufallsvariable, auf der y-Achse die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten. So zeigt die Verteilung, mit welcher Häufigkeit einzelne Ausprägungen zu erwarten sind. Je nach Ausprägung der Zufallsvariablen (stetig oder diskret) wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung durch eine andere Funktion beschrieben. Die Verspätung von Zuglinien kann durch solche Verteilungen beschrieben werden, indem der diskreten Höhe der Verspätung eine Wahrscheinlichkeit des Auftretens zugeordnet wird.

Zu-/Abgangszeit Zugangszeit = Zeitaufwand für die Quellanbindung, Abgangszeit = Zeitaufwand für die Ziellanbindung. *PTV VISUM*-Kenngröße der Zeit.

Zugnummer Die Zugnummern werden in den Kursbüchern der Eisenbahnunternehmen den einzelnen Fahrplanfahrten zugeordnet. Die Zugnummer besteht aus der Gattungsbezeichnung (ICE, IC, RE etc.) und einer maximal 5-stelligen Nummer, z. B. IC 1234 oder RB 12345.

ÖV-Personenfahrten Anzahl der Personen mit Beförderung in ÖV-Systemen, die umgelegt werden. Jede Person zählt nur einmal.

ÖV-Teilweg Ein ÖV-Weg ist beschrieben durch eine Abfolge von Teilwegen, die jeweils eine der folgenden Aktivitäten darstellen:

- Fahrplanfahrt von einem Haltepunkt zum nächsten Haltepunkt
- Ortswechsel vom Quellbezirk über eine Anbindung und Strecken zu einem Haltepunkt oder von dort zum Zielbezirk
- Umstieg an einem Haltepunkt inklusive Gehweg