

# FE 70.919/2015

## Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle

Stand: 09.08.2022



**Universität Stuttgart**

**Institut für Straßen- und Verkehrswesen**

**Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik**



**Planung Transport Verkehr AG**



**Technische Universität Dresden**

**Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr**

**Professur für Integrierte Verkehrsplanung und  
Straßenverkehrstechnik**



## **Autoren**

Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Lehrstuhl für  
Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

Dipl.-Ing. Eric Pestel

Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe

Dipl.-Wi.Ing. Udo Heidl

Dr.-Ing. Juliane Pillat

Technische Universität Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr,  
Professur für integrierte Verkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik

PD Dr.-Ing. habil. Christian Schiller

Dipl.-Ing. Robert Simon

## **Urheberrechtshinweis**

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden im Auftrag des  
Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur unter der FE-Nr. 70.919/2015  
(Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich bei den Autoren.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1	Motivation	9
1.2	Zielgruppe des Projekts	10
1.3	Aufbau des Projektberichts	11
1.4	Beiträge Dritter	14
<b>2</b>	<b>Methoden der Verkehrsnachfragemodellierung</b>	<b>15</b>
2.1	Modelle für die Planung des Verkehrs	15
2.2	Typologien von Verkehrsnachfragemodellen	17
2.2.1	Personen- und Wirtschaftsverkehrsmodelle	17
2.2.2	Verhaltensannahmen	18
2.2.3	Modellstufen und Rückkopplungen	19
2.2.4	Synthetische und inkrementelle Modelle	26
2.2.5	Makroskopische und mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle	27
2.2.6	Statische und dynamische Modelle (Berücksichtigung zeitlicher Veränderlichkeiten)	28
2.2.7	Einzelweg- und Wegekettenmodelle	29
2.3	Struktur eines Verkehrsnachfragemodells	31
2.3.1	Untersuchungsraum	31
2.3.2	Bestandteile eines Verkehrsplanungsmodells	32
2.3.3	Variablen und Parameter eines Verkehrsnachfragemodells	35
2.3.4	Ergebnisse eines Verkehrsnachfragemodells	36
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Praxis bei der Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen</b>	<b>38</b>
3.1	Überblick	38
3.2	Forschungsprojekte	42
3.2.1	Forschungsprojekt Analyse der Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen (D, 2001)	42
3.2.2	Forschungsprojekt QUALIMOD (D, 2008)	44
3.2.3	Forschungsprojekt Datenanforderungen an die Weiterentwicklung kleinräumiger Verkehrsnachfragemodelle des Wirtschaftsverkehrs (D, 2013)	45
3.2.4	Veröffentlichung Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen (D, 2016)	47
3.2.5	Forschungsprojekt Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen (CH, 2018)	47
3.3	Richtlinien und Leitfäden	49
3.3.1	National guidelines for transport system management in Australia (AUS, 2006)	49
3.3.2	Leitfaden Jaspers Appraisal Guidance (Transport) (EU, 2007)	50
3.3.3	FSV-Merkblatt (Entwurf) QUALIVERMO (A, 2012)	51
3.3.4	Richtlinie WebTAG (UK, 2014)	53
3.3.5	Leitfaden Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual (USA, 2014)	57
3.3.6	FGSV-Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen (Entwurf) (D, 20xx)	58
3.3.7	FGSV-Empfehlungen zur Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen zur Berechnung des Wirtschaftsverkehrs (D, 2020)	59
3.4	Öffentliche Ausschreibungen zu Verkehrsnachfragemodellen in Deutschland	61

<b>4</b>	<b>Einsatzbereiche von Verkehrsnachfragemodellen und gewünschte Modellergebnisse</b>	<b>63</b>
4.1	Anlass der Modellerstellung	63
4.2	Festlegung Bezugszeitraum	64
4.3	Abzubildende Entwicklungen und Maßnahmen	65
4.4	Gewünschter Modelloutput	68
4.5	Modellspezifikationsgenerator	68
<b>5</b>	<b>Hinweise und Empfehlungen für den Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen</b>	<b>70</b>
5.1	Abbildung der Entscheidungsprozesse (Modellstufen)	71
5.1.1	Diskrete Entscheidungsmodelle	71
5.1.2	Aktivitätenwahl in der Verkehrserzeugung	73
5.1.3	Zielwahl	75
5.1.4	Moduswahl	81
5.1.5	Simultane Aktivitäten- und Moduswahl	86
5.1.6	Simultane Ziel- und Moduswahl	87
5.1.7	Abfahrtszeitwahl	91
5.1.8	Routenwahl und Verbindungswahl in der Umlegung	92
5.1.9	Rückkopplungen zwischen den Modellstufen	106
5.1.10	Einsatz von Korrekturverfahren	109
5.2	Planungsraum und Untersuchungsraum	115
5.3	Abbildung Raum- und Siedlungsstruktur	115
5.4	Abbildung des Verkehrsangebots	118
5.4.1	Verkehrsmittel und Verkehrsmodi	118
5.4.2	Straßennetz	119
5.4.3	ÖV-Angebot	120
5.4.4	Nutzungsgebühren und Fahrtkosten	121
5.4.5	Kenngößenmatrizen	123
5.5	Abbildung der Verkehrsnachfrage	125
5.5.1	Personenverkehr	125
5.5.2	Wirtschaftsverkehr	127
5.5.3	Eventverkehr	130
5.6	Abbildung von Sharingangeboten	130
5.7	Externer Verkehr	137
5.8	Prognose	140
<b>6</b>	<b>Datengrundlagen und Datenquellen</b>	<b>142</b>
6.1	Daten zur Modellierung des Verkehrsangebots	142
6.1.1	Straßennetzmodell	142
6.1.2	Angebotsdaten des öffentlichen Verkehrs	148
6.1.3	Daten zum Radverkehrsnetz	149
6.1.4	Daten für die Verkehrszelleneinteilung	150
6.2	Daten zur Bevölkerung und Flächennutzung im Untersuchungsraum (Siedlungsstrukturdaten)	151
6.2.1	Einwohnerdaten	152
6.2.2	Arbeitsplatzdaten	153

6.2.3	Daten zum Wirtschaftsverkehr	155
6.2.4	Daten zu Schul- und Ausbildungsplätzen	156
6.2.5	Daten zum Einkaufen	157
6.2.6	Freizeitverkehr und private Erledigung	158
6.3	Daten zum Mobilitätsverhalten der Bevölkerung im Untersuchungsraum	159
6.4	Daten zum Verkehrsablauf im Netz (Verkehrsstärken und Fahrtzeiten)	161
6.4.1	Kfz-Verkehrsstärken (Dauerzählstellen, SVZ, Einzelzählungen)	161
6.4.2	Kfz-Fahrtzeitdaten	162
6.4.3	ÖV-Erhebungs- und Zähldaten	163
6.4.4	Erhebungs- und Zähldaten im Rad- und Fußgängerverkehr	164
6.5	Verkehrsnachfragedaten, die nicht vom Verkehrsnachfragemodell berechnet werden (externe Matrizen)	164
<b>7</b>	<b>Anforderungen an die Modellierungssoftware</b>	<b>166</b>
7.1	Checkliste Modellierungssoftware	166
7.2	Auswahl einer Modellierungssoftware in einer Ausschreibung (Anhang)	168
7.3	Vorgehen bei einem Softwareupdate	168
<b>8</b>	<b>Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen</b>	<b>170</b>
8.1	Vorgehensweise bei einer Qualitätssicherung	170
8.2	Grundlegende Anforderungen an Verkehrsnachmodelle	171
8.2.1	Wirklichkeitstreue	171
8.2.2	Transparenz	173
8.2.3	Operabilität	174
8.3	Ursachen für Abweichungen zwischen Modell und Erhebung	175
8.4	Gütemaße für die Überprüfung der Modellergebnisse	177
8.4.1	Einzelwerte	178
8.4.2	Mengen von Einzelwerten	187
8.4.3	Verteilungen	190
8.4.4	Matrizen	193
8.4.5	Grafische Darstellungen	197
8.5	Verifizierung der Spezifikation und der Implementierung	200
8.6	Überprüfung der Eingangsdaten	201
8.6.1	Verkehrserhebungsdaten	201
8.6.2	Siedlungsstrukturdaten	202
8.6.3	Verkehrsangebotsdaten	202
8.6.4	Umgang mit Mängeln bei den Eingangsdaten	203
8.7	Kalibrierung und Validierung	204
8.7.1	Einstellen der Parameter	204
8.7.2	Überprüfung der Parameter	205
8.7.3	Überprüfung der Modellergebnisse	205
8.7.4	Überprüfung des Modellverhaltens	209
8.7.5	Abschließende Validierung der Modellergebnisse	213
8.8	Abschätzung der Prognosegenauigkeit	213

<b>9</b>	<b>Anforderungen an die Dokumentation</b>	<b>217</b>
9.1	Modellhandbuch	218
9.1.1	Allgemeine Informationen	218
9.1.2	Ausgangslage, Problemanalyse und Ziele	218
9.1.3	Einsatzbereiche des Verkehrsnachfragemodells und gewünschte Modellergebnisse (siehe Kapitel 4)	218
9.1.4	Aufbau des Verkehrsnachfragemodells (siehe Kapitel 5)	219
9.1.5	Zusammenfassung der Kalibrierung und Validierung	221
9.1.6	Umgang und Handhabung des Modells	221
9.1.7	Beschreibung von Modellzuständen	222
9.1.8	Ausblick auf potentielle Weiterentwicklungen	222
9.1.9	Optional: Zusammenfassung für Modellierungslaien	222
9.2	Kalibrierungs- und Validierungsbericht	223
9.2.1	Allgemeine Informationen	223
9.2.2	Qualitätssicherung des Verkehrsnachfragemodells	223
<b>10</b>	<b>Hinweise zur Modellanwendung</b>	<b>225</b>
10.1	Festlegung der zu untersuchenden Maßnahmen	225
10.2	Abbildung der Maßnahmen im Modell	228
10.3	Durchführung der Modellrechnungen	229
10.4	Aufbereitung, Interpretation und Dokumentation der Ergebnisse	229
10.5	Nutzung der Modellergebnisse für die Verkehrsplanung	235
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>237</b>
11.1	Zusammenfassung	237
11.2	Organisatorische Aspekte einer Modellerstellung	239
11.3	Fazit	241
<b>12</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>243</b>
12.1	Literaturverzeichnis	243
12.2	Abbildungsverzeichnis	249
12.3	Tabellenverzeichnis	252
<b>13</b>	<b>Glossar und Nomenklatur</b>	<b>255</b>
13.1	Glossar und Abkürzungsverzeichnis	255
13.2	Nomenklatur	261
<b>14</b>	<b>Anlagen</b>	<b>264</b>
Anlage 1	Gütemaße für den Vergleich von Modellergebnissen	265
Anlage 2	Methoden	281
Anlage 3	Checklisten	309
Anlage 4	Dokumentationsvorlagen	310
Anlage 5	Tool zur Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen	311
Anlage 6	Modellspezifikationsgenerator	312
Anlage 7	Vorlage einer Leistungsbeschreibung	316

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Verkehrsnachfragemodelle sind ein wichtiges Werkzeug der Verkehrsplanung. Sie werden in Städten und Regionen eingesetzt, um vorhandene Zustände in einem Verkehrsnetz zu rekonstruieren und um die Wirkungen zukünftiger Entwicklungen oder geplanter verkehrlicher Maßnahmen abzuschätzen. Auf diese Weise dienen Verkehrsnachfragemodelle der Vorbereitung verkehrsplanerischer, betriebsplanerischer, verkehrstechnischer und verkehrspolitischer Entscheidungen.

Ein Verkehrsnachfragemodell ist ein Modell, das als Eingangsgrößen das Verkehrsangebot, die Siedlungsstruktur und Verhaltensparameter in einem Untersuchungsraum nutzt und darauf aufbauend alle verkehrsrelevanten Entscheidungsprozesse nachbildet, die zu Ortsveränderungen im Personen- und Güterverkehr führen. Personenverkehr ergibt sich aus dem Bedürfnis oder aus der Notwendigkeit von Menschen an Aktivitäten (z.B. Arbeiten, Bildung, Einkaufen oder Freizeit) teilzunehmen. Im privaten Personenverkehr und im Personenwirtschaftsverkehr umfassen die Entscheidungen deshalb zuerst die Aktivitätenwahl, die dann durch eine Zielwahl mit einem Aktivitätenort verknüpft wird. Entscheidungen zur Verkehrsmittelwahl, Abfahrtszeitwahl und Routenwahl konkretisieren dann den Ablauf der Ortsveränderung zum Aktivitätenort. Güterwirtschaftsverkehr ist das Ergebnis logistischer Entscheidungsprozesse, die den Material- und Warenfluss zwischen Unternehmen und zum Endkunden, sowie die Entsorgung organisieren. Als primäres Ergebnis liefert ein Verkehrsnachfragemodell Matrizen der Angebotsqualität (Kenngrößenmatrizen), Verkehrsnachfragematrizen, Verkehrsstärken auf Netzelementen und Routen sowie Kenngrößen des Verkehrsaufwands (Personenkilometer, Fahrzeugkilometer, Personenstunden, Verlustzeiten). Diese primären Ergebnisse können als Input für weitere Modellrechnungen genutzt werden, die dann beispielsweise Lärm- und Schadstoffemissionen oder Erlöse aus Fahrkartenverkäufen ermitteln.

Da die Modellergebnisse Grundlage für vielfältige Entscheidungen sind, erwarten die Nutzer der Modelle eine angemessene Qualität der Ergebnisse. Ausgehend von der Beobachtung, dass in der Praxis unterschiedliche Verkehrsnachfragemodelle zum Einsatz kommen, deren Ergebnisqualität für den Nutzer der Modellergebnisse meist nicht überprüfbar ist, verfolgt das Projekt das Ziel, Anforderungen an den Aufbau und die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen zu formulieren, die den Nutzern, den Anwendern und den Erstellern von Verkehrsnachfragemodellen als gemeinsame Basis dienen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden im Projekt die folgenden Inhalte bearbeitet:

- Erstellung eines Überblicks über Verkehrsnachfragemodelle,
- Darstellung der Einsatzbereiche von Verkehrsnachfragemodellen und den daraus resultierenden Anforderungen,
- Entwicklung von Empfehlungen für die Erstellung und Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen in Kommunen und Regionen,

- Auswahl geeigneter Qualitätsmaße für den Nachweis der Modellqualität und
- Entwicklung von Vorgaben für die Dokumentation von Verkehrsnachfragemodellen,

Als Projektergebnisse werden neben dem Bericht mehrere Dateien zur Verfügung gestellt, die in den Anlagen 3 bis 7 beschreiben sind und den Prozess der Modellerstellung unterstützen sollen (Tabelle 1-1).

Projektergebnis	Anlage	Format
Checklisten <ul style="list-style-type: none"> <li>• Checkliste Eingangsdaten der Modellierung</li> <li>• Checkliste Einsatzbereiche von Verkehrsnachfragemodellen</li> <li>• Checkliste Verkehrsmodellierungssoftware</li> </ul>	Anlage 3	doc
Dokumentationsvorlagen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorlage Validierungsbericht,</li> <li>• Vorlage Modellhandbuch</li> </ul>	Anlage 4	doc
Tool zum Anwenden der vorgestellten Qualitätsmaße	Anlage 5	xls
Modellspezifikationsgenerator zum Erzeugen von anwendungsspezifischen Spezifikationen für eine Leistungsbeschreibung	Anlage 6	xls
Vorlage einer Leistungsbeschreibung	Anlage 7	doc

Tabelle 1-1: Übersicht über die Projektergebnisse.

## 1.2 Zielgruppe des Projekts

Der Projektbericht richtet sich an Personen, die mit Verkehrsnachfragemodellen arbeiten oder die Ergebnisse von Verkehrsnachfragemodellen nutzen. Im Projekt werden vier Personenkreise unterschieden, die im Rahmen einer Modellanwendung eine besondere Rolle übernehmen:

- **Modellnutzer:**  
 Modellnutzer sind Verkehrsingenieure und politische Entscheidungsträger in Städten und Regionen, die die Modellergebnisse nutzen, um verkehrsplanerische Entscheidungen zu treffen. Sie initiieren und beauftragen die Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells und sollten in der Ausschreibung festlegen, wofür das Modell eingesetzt wird und welche Anforderungen erfüllt werden sollen.  
 Der Projektbericht informiert Modellnutzer über die Möglichkeiten und Grenzen eines Nachfragemodells. Er liefert Hinweise zu Einsatzbereichen von Verkehrsnachfragemodellen, aus denen sich die Anforderungen ergeben, die in einer Ausschreibung enthalten sein sollten. Außerdem enthält der Bericht eine Vorlage für eine Leistungsbeschreibung als Teil einer Ausschreibung.
- **Modellanwender:**  
 Modellanwender sind Personen, die ein validiertes Verkehrsnachfragemodell für Fragestellungen in der Praxis oder in der Forschung für Modellrechnungen anwenden. Sie lassen die Modellarchitektur und die Modellparameter unverändert, ändern aber die Eingangsgrößen des Modells, z.B. durch die Abbildung einer verkehrsplanerischen Maßnahme. Typische Aufgaben eines Modellanwenders sind die Erstellung einer Prognose und die Untersuchung von Maßnahmen.  
 Der Projektbericht informiert Modellanwender über die Möglichkeiten und Grenzen eines Nachfragemodells, über die zu erwartenden Aussagegenauigkeiten eines Modells und liefert Hinweise zur Anwendung eines Modells in der Prognose.

- **Modellersteller:**

Modellersteller sind Personen, die das Verkehrsnachfragemodell entwickeln. Sie erstellen das Modell so, dass es den vom Modellanwender oder vom Modellnutzer gewünschten Anforderungen entspricht. Sie kalibrieren, validieren und testen das Verkehrsnachfragemodell und müssen die Vorgehensweise der Modellerstellung und die Modellüberprüfung angemessen dokumentieren. Dazu gehören Aussagen zur Modellgenauigkeit und zu den Einsatzgrenzen bei der Modellanwendung.

Der Projektbericht liefert den Modellerstellern Hinweise und Empfehlungen für den Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen und macht Vorgaben zur Überprüfung der Modellqualität.

- **Hersteller von Software für die Verkehrsnachfragemodellierung:**

Die Softwarehersteller müssen Sorge tragen, dass die Software die Wirkungszusammenhänge formal und numerisch richtig berechnet und die Verfahren nachvollziehbar sowie vollständig dokumentiert sind. Sie können dem Modellierer durch eine bedienungsfreundliche Oberfläche, geeignete Daten- und Programmierschnittstellen und durch integrierte Prüfmethode eine effiziente Modellerstellung ermöglichen.

Der Projektbericht formuliert Anforderungen an die Software und definiert Methoden zur Überprüfung der Modellqualität, die die Hersteller in die Software integrieren können.

### **1.3 Aufbau des Projektberichts**

Der Aufbau des Projektberichts orientiert sich am Ablauf einer Modellerstellung und der sich anschließenden Modellanwendung. Dieser Ablauf der erforderlichen Arbeitsschritte ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Für jeden Arbeitsschritt ist das zugehörige Kapitel des Projektberichts angegeben. Die vorangestellten Kapitel 2 und 3 geben einen Überblick über die Methoden der Verkehrsnachfragemodellierung und den Stand von Forschung und Praxis.

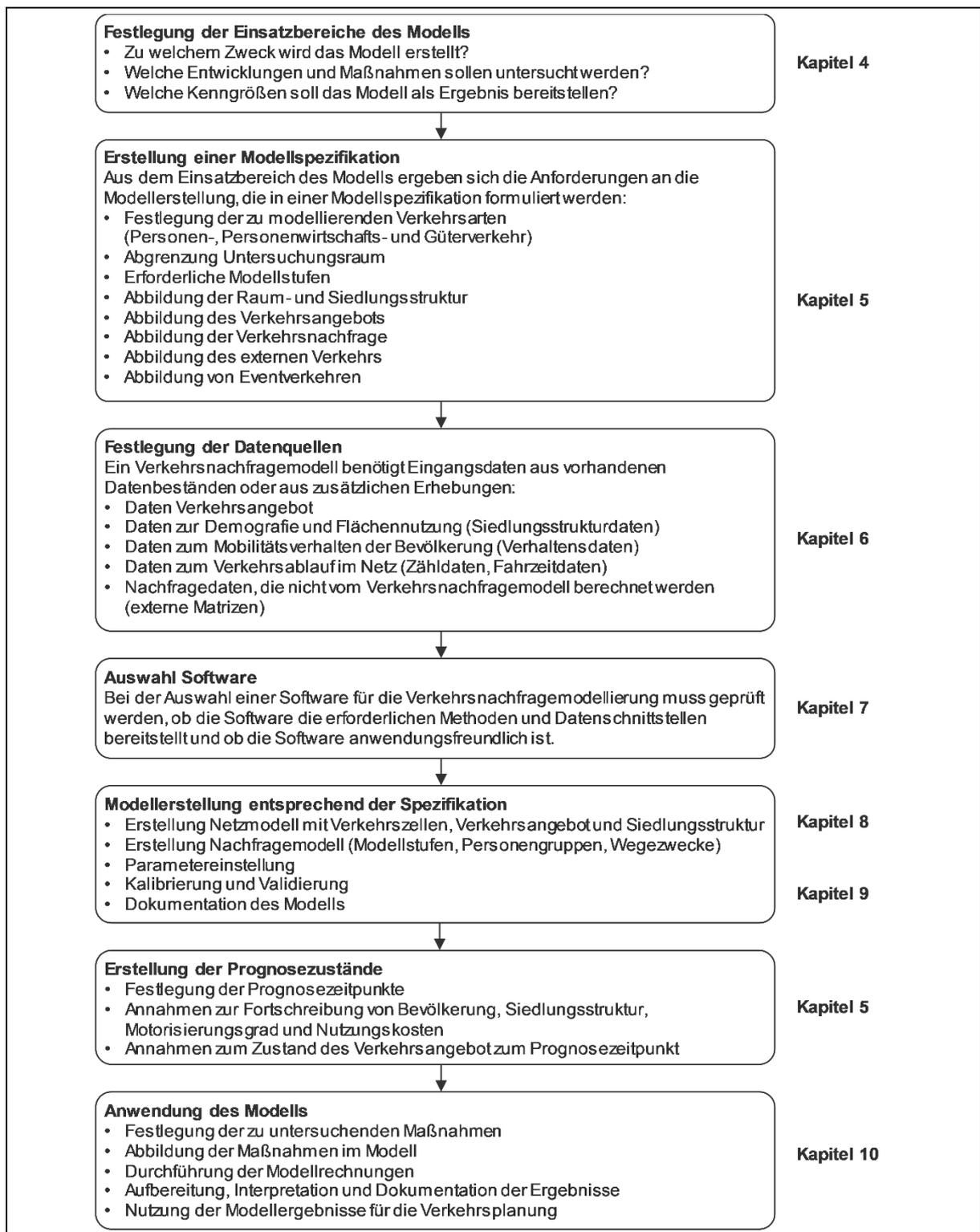


Abbildung 1-1: Arbeitsschritte zur Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells und Zuordnung der Arbeitsschritte zu den Kapiteln des Berichts.

Der vorliegende Bericht ist damit wie folgt aufgebaut:

- Kapitel 2 - Methoden der Verkehrsnachfragemodellierung:  
Das Kapitel gibt einen Überblick über Verkehrsnachfragemodelle. Es wird dargestellt, was ein Verkehrsnachfragemodell ist, welche Annahmen der Nachfragemodellierung zugrunde liegen, wie es aufgebaut ist und welche Modelltypen unterschieden werden.

- Kapitel 3 - Stand der Forschung und Praxis bei der Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen:  
Dieses Kapitel beschreibt den Stand der Forschung und Technik, der in Forschungsprojekten und in Richtlinien dokumentiert ist. Außerdem werden Anforderungen an die Modellbildung ausgewertet, die in zugänglichen Ausschreibungen im deutschsprachigen Raum formuliert wurden.
- Kapitel 4 - Einsatzbereiche von Verkehrsnachfragemodellen:  
Ein Verkehrsnachfragemodell wird zu einem bestimmten Zweck erstellt. Es soll Kenngrößen des Verkehrsangebots und der Verkehrsnachfrage für den heutigen Zustand und für zukünftige Zustände bereitstellen und so Grundlagen für verkehrsplanerische Entscheidungen liefern. Damit ein Verkehrsnachfragemodell diesen Zweck erfüllen kann, müssen vom Modellnutzer der Anlass der Modellerstellung, die abzubildenden Entwicklungen und Maßnahmen sowie die gewünschten Ergebniskenngrößen formuliert werden. Hierzu bietet Kapitel 4 Hinweise. Es wird außerdem ein Modellspezifikationsgenerator als eigenständiges interaktives Werkzeug bereitgestellt, der bei der Erstellung einer Modellspezifikation unterstützen soll.
- Kapitel 5 - Hinweise und Empfehlungen für den Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen:  
Das Kapitel gibt Hinweise und Empfehlungen für die einzelnen Modellstufen, zur Abgrenzung des Untersuchungsraums, zur Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur, des Verkehrsangebots und der Verkehrsnachfrage. Es wird dargestellt, wie mit dem Wirtschaftsverkehr, mit Eventverkehren und dem externen Verkehr umgegangen werden kann und was bei einer Modellprognose zu berücksichtigen ist.
- Kapitel 6 - Datengrundlagen und Datenquellen:  
Für die Erstellung und die Validierung eines Verkehrsnachfragemodells sind u.a. Daten zum Mobilitätsverhalten, Verkehrsangebotsdaten, sozioökonomische Daten und Siedlungsstrukturdaten erforderlich. Diese Daten und geeignete Datenquellen werden in Kapitel 6 beschrieben.
- Kapitel 7 - Anforderungen an die Modellierungssoftware:  
Verkehrsnachfragemodelle werden von den Modellerstellern mit Hilfe einer Modellierungssoftware implementiert. Das validierte Modell wird dann von Modellanwendern unter Nutzung der Modellierungssoftware für die Zwecke der Verkehrsplanung eingesetzt. In Kapitel 7 werden den Kommunen, Modellerstellern und Modellanwendern Hinweise zur Auswahl einer geeigneten Modellierungssoftware gegeben.
- Kapitel 8 - Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen:  
In diesem Kapitel werden Anforderungen an die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen formuliert und Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der Kalibrierung und Validierung gegeben.
- Kapitel 9 - Anforderungen an die Dokumentation:  
In diesem Kapitel finden sich Anforderungen an die Modelldokumentation. Dabei werden zwei Kategorien unterschieden: Die Dokumentation der Modellimplementierung (Modellhandbuch) und die Dokumentation der Modellkalibrierung und –validierung (Validierungsbericht).
- Kapitel 10 - Hinweise zur Modellanwendung:  
Dieses Kapitel gibt Hinweise zur Abbildung von Maßnahmen in einem Verkehrsnachfragemodell und

zur automatisierten Durchführung von Modellrechnungen und Modellauswertungen mit dem Ziel, die Modellrechnungen reproduzierbar und für Dritte nachvollziehbar zu gestalten.

## 1.4 Beiträge Dritter

Kein Forschungsprojekt beginnt bei null und so baut auch dieser Forschungsbericht auf Vorarbeiten und parallellaufenden Arbeiten auf.

Der Arbeitskreis 1.2.6. „Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen des Personenverkehrs“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) arbeitet derzeit an den „Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen“ [42]. Da mehrere Forschungsberichtsautoren Mitglied in diesem Arbeitskreis sind (M. Friedrich, E. Pestel, U. Heidl und J. Pillat), wurde die Möglichkeit genutzt, bestimmte Themen – insbesondere die Hinweise und Empfehlungen in Kapitel 5 und die Qualitätssicherung in Kapitel 8 – dort zu diskutieren und Formulierungen zu schärfen. Dafür standen während der Projektlaufzeit 12 Sitzungstermine zur Verfügung. Texte des Arbeitskreises sind somit die Grundlage für einen Teil der Texte dieses Forschungsprojektes, andererseits finden auch Texte des Forschungsprojektes Eingang in die oben genannten „Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen“ [42]. Bei den Texten des Arbeitskreises handelt es sich häufig um Gemeinschaftsleistungen, teilweise aber auch um größere Einzelleistungen, insbesondere der Beitrag zu diskreten Wahlmodellen (siehe Kapitel 5.1.1) von Christian Winkler (DLR). Das beschriebene Vorgehen wurde mit der FGSV und dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur abgeklärt.

Das Forschungsprojekt „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen“ [107], beauftragt von der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI), wurde von Autoren diesen Forschungsberichts (M. Friedrich und E. Pestel, Universität Stuttgart) gemeinsam mit N. Rieser und B. Tasnady (Ernst Basler + Partner) bearbeitet. Es bildet in weiten Teilen eine Grundlage für diesen Forschungsbericht, der aber um mehrere Aspekte erweitert wurde (u.a. Berücksichtigung des Wirtschaftsverkehrs, Datengrundlagen, Umgang mit Sharingangeboten, Anforderungen an die Modellierungssoftware, Orientierungswerte für die Gütemaße, Methodenbeschreibungen, Checklisten, Leistungsbeschreibung).

Der Stand der Forschung wurde u.a. in einem Projekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) „Einflussgrößen auf die Qualität von makroskopischen Nachfragemodellen im Personenverkehr“ [68] von Autoren dieses Forschungsberichts weiterentwickelt (M. Friedrich und E. Pestel von der Universität Stuttgart sowie C. Schiller und R. Simon von der TU Dresden). Im Zuge dieses Forschungsprojektes entstanden Beiträge, die ebenfalls Eingang in diesen Forschungsbericht finden:

- Pestel et al.: „Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen“ [97],
- Pestel: „Considerations about the quality assessment of travel time and travel distance distributions in transport modelling. A proposal for a standardized methodology“ [96],
- Simon et al.: „Generalizing the relative gap for measuring the convergence of a logit-based user-equilibrium assignment“ [117],

- Friedrich et al.: „Scalable GEH: A Quality Measure for Comparing Observed and Modeled Single Values in a Travel Demand Model Validation“ [65],
- Simon et al.: „Next Generation Verkehrsnachfragemodelle“ [118].

## 2 Methoden der Verkehrsnachfragemodellierung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Verkehrsnachfragemodelle für den Personen- und Wirtschaftsverkehr. Große Teile des Textes zum Personenverkehr wurden von Friedrich [60] über mehrere Jahre in Skripten für die Lehre (2003-2017) entwickelt sowie in Buchbeiträgen (2016) [63] und in Veröffentlichungen (2011) [59] publiziert. Die Inhalte der Texte wurden 2015 mit dem Arbeitskreis „Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen des Personenverkehrs“ der deutschen Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen diskutiert und finden sich in ähnlicher Form in den Entwürfen geplanter Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen des Personenverkehrs [42] und des Wirtschaftsverkehrs [43]. Sie basieren zum Teil auf Lehrbüchern, u.a. den Lehrbüchern von Wermuth [136], Lohse & Schnabel [111] und Ortúzar & Willumsen [94].

### 2.1 Modelle für die Planung des Verkehrs

Eine wesentliche Aufgabe der Verkehrsplanung ist es, bestehende Zustände zu untersuchen und die Wirkungen potenzieller Maßnahmen (z.B. Einrichtung einer neuen ÖV-Linie<sup>1</sup>) und zukünftiger Entwicklungen (z.B. Demografie, Kraftstoffpreise) abzuschätzen. Der Verkehr im Verkehrsnetz ist im Personenverkehr das Ergebnis vielfältiger individueller Entscheidungsprozesse von Privatpersonen. Wirtschaftsverkehr erklärt sich aus Entscheidungsprozessen von wirtschaftlichen Akteuren in Unternehmen. Verkehrsmodelle bilden die Entscheidungsprozesse der Privatpersonen und der wirtschaftlichen Akteure ab. Tabelle 2-1 zeigt verkehrsrelevante Entscheidungsprozesse von Privatpersonen und wirtschaftlichen Akteuren, die letztendlich zu Verkehr im Verkehrsnetz führen. Während Wahlentscheidungen von Privatpersonen von individuellen Präferenzen geprägt werden, sind Entscheidungen wirtschaftlicher Akteure das Ergebnis betriebswirtschaftlicher Abwägungen und Optimierungen. Die Entscheidungen reichen von langfristigen Entscheidungen bis hin zu kurzfristigen und spontanen Entscheidungen.

- Bei Privatpersonen betreffen langfristige Entscheidungen beispielsweise die Wahl des Wohnorts und die Wahl des Arbeitsplatzes. Diese Entscheidungen beeinflussen nachfolgende Entscheidungen bezüglich der Beschaffung von Fahrzeugen oder Zeitkarten, die sich ihrerseits auf die Zielwahl und die Moduswahl auswirken. Entscheidungen über die Aktivitätenfolge und die Aktivitätenorte eines Tages, über die Wahl der Abfahrtszeit und der Fahrtroute werden mittel- bis kurzfristig getroffen.
- Wirtschaftliche Akteure treffen ebenfalls langfristige Entscheidungen über Arbeits- und Produktionsstandorte. Aus den spezifischen Material- und Warenflüssen eines Unternehmens

---

<sup>1</sup> ÖV: Öffentlicher Verkehr

ergeben sich Anforderungen an den Transport mit geeigneten Transportgefäßen und den Transporteur, die lang- bis mittelfristig geplant werden. Die Planung des eigentlichen Gütertransports, der mit der Bildung von Touren und einer Fahrzeugeinsatzplanung verbunden ist, erfolgt mittel- bis kurzfristig.

- Verkehrsteilnehmende im Straßenverkehr entscheiden in noch kürzeren Zeitabständen über die Wahl der Fahrgeschwindigkeit, die Wahl des Fahrstreifens auf der Autobahn und die Wahl des Abstands zum Vorderfahrzeug.

Für die Zwecke der Verkehrsplanung existieren verschiedene Modelle, die für bestimmte Planungsaufgaben entwickelt wurden und dementsprechend bestimmte Entscheidungsprozesse in den Mittelpunkt der Modellierung stellen:

- Flächennutzungsmodelle bilden Standortentscheidungen privater Personen und wirtschaftlicher Akteure nach. Sie prognostizieren so die Verteilung der Bevölkerung und der Aktivitätenorte in einem Untersuchungsraum.
- Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle bestimmen den Anteil der Personen, denen ein Pkw oder eine ÖV-Zeitkarte zur Verfügung steht. Pkw und ÖV-Zeitkarten können als Mobilitätswerkzeuge bezeichnet werden. Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle bilden damit die Entscheidungen bei der Mobilitätswerkzeugwahl nach.
- Verkehrsnachfragemodelle bestimmen die Anzahl der Ortsveränderungen, die die Verkehrsteilnehmenden im Verkehrsnetz durchführen. Sie bilden hierfür die Entscheidungsprozesse von Menschen nach, die zu Ortsveränderungen führen. Im Personenverkehr umfassen diese Entscheidungen die Aktivitätenwahl, die Zielwahl, die Moduswahl, die Abfahrtszeitwahl und die Routenwahl. Im Güterverkehr ermitteln die Modelle das Frachtaufkommen und bilden die Transportlogistikprozesse der Tourenplanung nach. Im Güterfernverkehr gibt es wie im Personenverkehr eine Verkehrsmittelwahl, im regionalen Güterverkehr ist das Verkehrsmittel in der Regel vorgegeben.
- Verkehrsflussmodelle simulieren die Interaktion zwischen Fahrzeugen bzw. Fußgängern, die im Straßenraum oder auf Schienenverkehrswegen auftreten. Verkehrsflussmodelle für den Kraftfahrzeugverkehr bilden die Geschwindigkeitswahl, die Fahrstreifenwahl und das Abstandswahlverhalten nach.

Moderne Verkehrsplanungsmodelle integrieren zunehmend die Eigenschaften mehrerer Modelltypen. So kann ein Verkehrsnachfragemodell mit einem Verkehrsflussmodell kombiniert werden, um möglichst genaue Reisezeiten für die Zielwahl und die Moduswahl zu erhalten.

Modelltyp	Teilmodelle	
	Personenverkehr	regionaler Güterverkehr
Flächennutzungsmodelle	Standortwahl	
Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle	Fahrzeugbeschaffungswahl	
	Zeitkartenbeschaffungswahl	
Verkehrsnachfragemodelle	Aktivitätenwahl	Verkehrsaufkommensermittlung
	Zielwahl	Zielwahl
	Moduswahl	Tourenbildung, Fahrzeugklassenzuordnung
	Abfahrtszeitwahl	
	Routenwahl	
Verkehrsflussmodelle	Geschwindigkeitwahl	
	Fahrstreifenwahl	
	Fahrzeugfolgeabstandwahl	

Tabelle 2-1: Verkehrsrelevante Entscheidungen und ihre Abbildung in Verkehrsmodellen.

## 2.2 Typologien von Verkehrsnachfragemodellen

Ein Verkehrsnachfragemodell umfasst eine Reihe von Methoden, mit denen sich Verkehrsnachfragematrizen und Verkehrsstärken im Verkehrsnetz eines Untersuchungsraumes bestimmen lassen. Hierfür bildet das Verkehrsnachfragemodell Objekte und Prozesse der realen Welt in vereinfachter und abstrakter Form nach. Die Vereinfachungen und Abstrahierungen basieren auf Annahmen. Abhängig von den Annahmen lassen sich verschiedene Modelltypologien unterscheiden.

### 2.2.1 Personen- und Wirtschaftsverkehrsmodelle

Verkehrsnachfragemodelle lassen sich typologisch danach unterscheiden, ob sie Ortsveränderungen von privatem oder wirtschaftlichem Verkehr abbilden. Der private Verkehr beinhaltet dabei den privaten Personenverkehr sowie den privaten Güterverkehr. Terminologisch eigentlich inkonsistent wird hier oft lediglich vom Personenverkehr gesprochen. Von Wirtschaftsverkehr spricht man, wenn Personen und Güter aufgrund wirtschaftlicher Aktivitäten ihren Ort verändern. Ergo wird zwischen Personenwirtschaftsverkehr und Güter (-wirtschafts-) verkehr unterschieden. Ersterer lässt sich nochmals in Dienstreise- und Dienstleistungsverkehre und Letzterer in Versorgungs- und Entsorgungsverkehre unterteilen.

	Privater Verkehr	Wirtschaftsverkehr
Ortsveränderungen von Personen	Privater Personenverkehr <ul style="list-style-type: none"> <li>• zur Arbeit</li> <li>• zur Ausbildung</li> <li>• zum Einkauf</li> <li>• zur Freizeit</li> <li>• zur Wohnung</li> <li>• ...</li> </ul>	Personenwirtschaftsverkehr <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dienstweg zu einem dienstlichen Termin</li> </ul>
Ortsveränderungen von Fahrzeugen zum Gütertransport	Privater Güterverkehr <ul style="list-style-type: none"> <li>• privater Umzug</li> <li>• privater Versorgungs- und Entsorgungsverkehr</li> </ul>	Güterwirtschaftsverkehr <ul style="list-style-type: none"> <li>• Versorgungsverkehre</li> <li>• Entsorgungsverkehre</li> </ul>
Ortsveränderung von Fahrzeugen, die am Zielort benötigt werden		Sonderverkehr <ul style="list-style-type: none"> <li>• Feuerwehr</li> <li>• Baustellenfahrzeuge</li> </ul>
Ortsveränderung von Fahrzeugen zum Personentransport		Personentransportverkehr <ul style="list-style-type: none"> <li>• ÖV-Fahrzeuge</li> <li>• Taxi-Fahrzeuge</li> </ul>

Tabelle 2-2: Terminologie zum Personen- und Wirtschaftsverkehr.

Daraus ergeben sich unterschiedliche Verhaltensannahmen und Ansprüche an die Ausgestaltung des Verkehrsnachfragemodells und damit konkret an die Abbildung der Entscheidungsprozesse. Die Verhaltensannahmen für Personen- und Wirtschaftsverkehr werden in Kapitel 2.2.2 beschrieben und die Gestaltung der Modellstufen von Verkehrsnachfragemodellen für den Personen- und Wirtschaftsverkehr wird in Kapitel 2.2.3 erläutert.

## 2.2.2 Verhaltensannahmen

Die meisten Verkehrsnachfragemodelle basieren auf folgenden grundlegenden Annahmen:

- Menschen haben Bedürfnisse, die aushäusige Aktivitäten erfordern. Das führt zu Ortsveränderungen. Bei der Planung und der Durchführung einer Ortsveränderung wählen die Menschen aus einer Menge von Alternativen. Hierfür bewerten die Menschen jede Alternative und entscheiden sich für die Alternative, die aus ihrer Sicht optimal ist, d.h. jeder Mensch maximiert seinen persönlichen Nutzen.
- Der von den Verkehrsteilnehmenden wahrgenommene Nutzen einer Alternative wird von den Informationen beeinflusst, über die die Verkehrsteilnehmenden verfügen. Dabei wird angenommen, dass die Verkehrsteilnehmenden entweder über unvollständige oder über perfekte Informationen verfügen.
- Die individuellen Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden können die Verkehrslage im Netz beeinflussen. Das ist der Fall, wenn eine hohe Nachfrage den Verkehrsfluss und die Angebotsqualität verändert. Abbildung 2-1 zeigt, wie die Nachfrage die Angebotsqualität und damit die Entscheidungen anderer Verkehrsteilnehmender beeinflussen kann.
- Die Verkehrsnachfrage und das Verkehrsangebot befinden sich über einen längeren Zeitraum in einem stationären Zustand. Diese Annahme unterstellt, dass die Verkehrsteilnehmenden über die zu erwartende Verkehrslage im Netz informiert sind und ihre Entscheidungen so anpassen, dass sich das System in einem Gleichgewichtszustand befindet. In diesem Zustand behalten die

Verkehrsteilnehmenden ihre Entscheidungen bei, so dass die Routen und die Fahrtzeiten zwischen aufeinanderfolgenden Tagen konstant bleiben.

- Im Wirtschaftsverkehr treten andere Verkehrsteilnehmende als im Personenverkehr auf, die durch die Ortsveränderung auch andere Bedürfnisse befriedigen. Die Annahme der persönlichen Nutzenmaximierung als alleinige Entscheidungsgrundlage wie im Personenverkehr ist für den Wirtschaftsverkehr nicht sinnvoll. Als Grundlage wirtschaftlichen Handelns werden auch die Prinzipien der gewerblichen Gewinnmaximierung bei der Entscheidungsfindung angewendet. Neben dem Verkehrsteilnehmenden treten so auch Akteure im betrieblichen Hintergrund auf, die beispielsweise durch die Planung von Logistik- und Transportprozessen die Ortsveränderungsentscheidungen mitbeeinflussen.

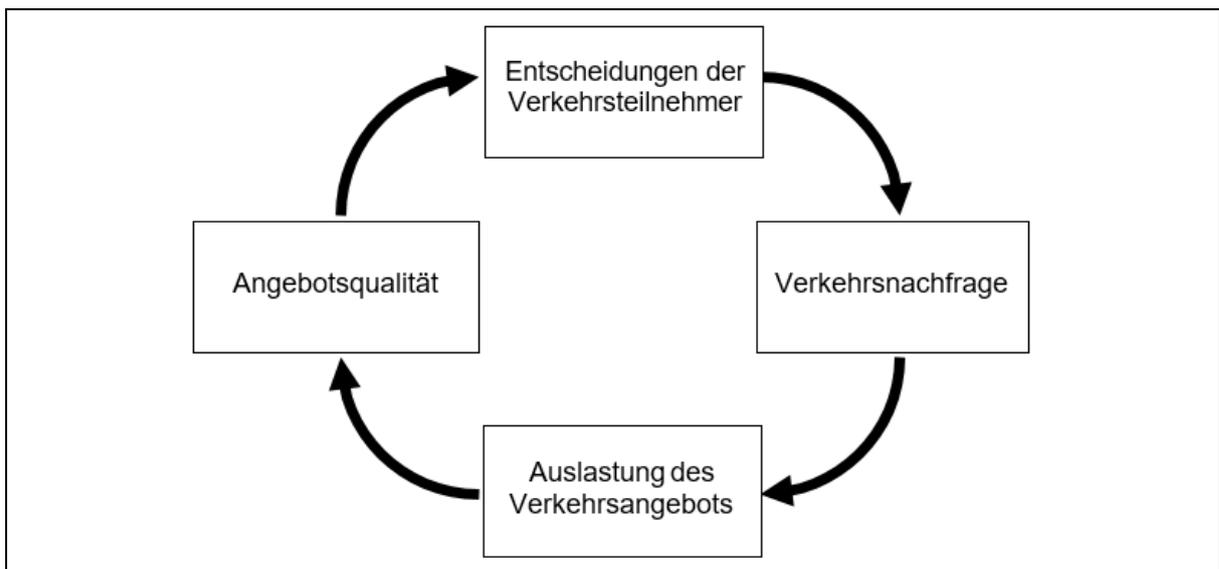


Abbildung 2-1: Rückkopplung zwischen den Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden, der Verkehrsnachfrage und der Angebotsqualität (Bildquelle: Friedrich et al. [63]).

### 2.2.3 Modellstufen und Rückkopplungen

Die in Tabelle 2-1 dargestellten Wahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmenden können in einem synthetischen Modell sequenziell in einzelnen Modellstufen abgebildet werden. Da Wahlentscheidungen nicht immer sequenziell ablaufen, kann es sinnvoll sein, Modellstufen zusammenzufassen. Außerdem können die Wirkungen späterer Modellstufen Wirkungen auf vorangegangene Modellstufen haben, so dass eine Rückkopplung der Modellstufen zu realistischeren Ergebnissen führen kann.

#### 2.2.3.1 Vier-Stufen-Modell für den Personenverkehr

Das Vier-Stufen-Modell (vgl. Bates [7] und Boyce & Williams [16]) bildet die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden zur Aktivitätenwahl, zur Zielwahl, zur Moduswahl und zur Routenwahl in vier sequenziellen Teilmodellen ab.

Die Verkehrserzeugung, die Zielwahl und die Moduswahl werden unter anderem vom Wegezweck und den Eigenschaften der Verkehrsteilnehmenden beeinflusst. Aus diesem Grund unterscheiden

Verkehrsnachfragemodelle Nachfragegruppen. Eine Nachfragegruppe  $g$  kann alle Ortsveränderungen eines Wegezwecks (zur Arbeit), einer Quelle-Ziel-Gruppe (z.B. Wohnen – Arbeiten), einer Aktivitätenkette (z.B. Wohnen – Arbeiten – Einkaufen) umfassen, die von einer Personengruppe (z.B. Erwerbstätige mit Pkw-Besitz) durchgeführt werden.

- Aktivitätenwahl- oder Verkehrserzeugungsmodelle bestimmen die Zahl der Ortsveränderungen, die von den Bewohnern des Untersuchungsraumes in einem Zeitraum durchgeführt werden. Ergebnis dieses Teilmodells sind die produzierten und angezogenen Ortsveränderungen einer Nachfragegruppe  $g$ .

produzierte  
Ortsveränderungen  $d$   
in Zelle  $o$   
von der  
Nachfragegruppe  $g$ :

$$d_{go}^p$$

angezogene  
Ortsveränderungen  $d$   
in Zelle  $d$   
von der  
Nachfragegruppe  $g$ :

$$d_{gd}^a$$

- Zielwahl- oder Verkehrsverteilungsmodelle ermitteln die Quellen  $o$  und die Ziele  $d$  der Ortsveränderungen und somit die Ortsveränderungen zwischen den Verkehrszellen  $o$  und  $d$ . Ergebnis dieses Teilmodells ist eine Nachfragematrix je Nachfragegruppe  $g$ .

Ortsveränderungen  $d$   
der Nachfragegruppe  $g$   
zwischen den Zellen  $o$   
und  $d$ :

$$d_{god}$$

- Moduswahl- oder Verkehrsaufteilungsmodelle bilden die Wahl des Modus  $m$  für die einzelnen Ortsveränderungen nach. Ergebnis dieses Teilmodells ist eine Nachfragematrix je Modus  $m$  und Nachfragegruppe  $g$ .

Ortsveränderungen  $d$   
der Nachfragegruppe  $g$   
zwischen den Zellen  $o$   
und  $d$   
mit Modus  $m$ :

$$d_{godm}$$

- Routenwahl- oder Umlegungsmodelle ermitteln die Routen  $r$  im Verkehrsnetz und verteilen die Nachfrage auf die Routen und damit auf die Netzelemente (Strecken, Knoten)  $s$  im Verkehrsnetz. Ergebnis sind Verkehrsstärken auf den Netzelementen  $s$ .

Ortsveränderungen  $d$   
der Nachfragegruppe  $g$   
zwischen den Zellen  $o$   
und  $d$   
mit Modus  $m$   
auf Route  $r$ :

$$d_{godmr}$$

Am Ende dieser vierstufigen Modellkette sind die Ortsveränderungen  $d_{godmr}$  mit ihren Routen bekannt. Werden die Ortsveränderungen, deren Routen  $r$  ein bestimmtes Netzelement  $s$  enthalten, aggregiert, so ergibt sich die Verkehrsstärke (Verkehrsbelastung)  $q_s$  dieses Netzelementes für alle Verkehrsmodi:

$$q_s = \sum_g \sum_o \sum_d \sum_m \sum_r \sum_{s \in r} d_{godmr}$$

Das Ergebnis wird u.a. als Verkehrsstärkenkarte dargestellt, in der die Balkendicke die Verkehrsstärke auf den Netzelementen repräsentiert.

Abbildung 2-2 zeigt den Ablauf des Vier-Stufen Modells mit den Eingangs- und Ausgabegrößen für jeden Modellschritt. Kenngrößenmatrizen beschreiben die Angebotsqualität (z.B. Reisezeit, Umsteigehäufigkeit, Bedienungshäufigkeit) für die Quelle-Ziel-Relationen im Verkehrsnetz. Die Kenngrößenmatrizen werden in einem vorgeschalteten Schritt berechnet, der der Routenwahl ähnelt. Grundlage der Berechnung ist ein unbelastetes Netz oder ein Netz, das mit einer vorab geschätzten Nachfragematrix belastet wird.

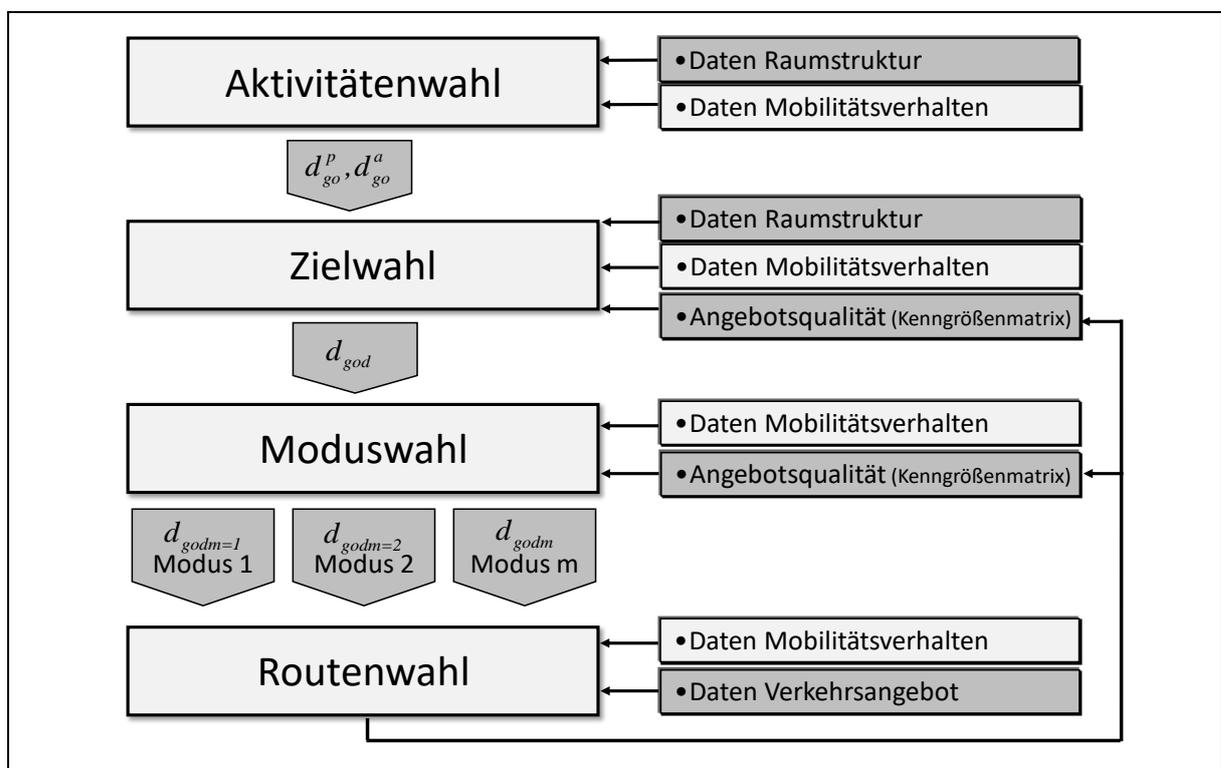


Abbildung 2-2: Das Vier-Stufen Modell mit den wesentlichen Eingangsgrößen: Siedlungsstrukturdaten, Verhaltensdaten, Verkehrsangebotsdaten (Bildquelle: Friedrich [60]).

### 2.2.3.2 Vier-Stufen-Modell für den regionalen Wirtschaftsverkehr

Verkehrsrelevante Entscheidungen im regionalen Wirtschaftsverkehr können in einem Vier-Stufen-Modell abgebildet werden, das sich in die sequenziellen Teilmodelle Verkehrserzeugung, Zielwahl, Tourenbildung und Routenwahl gliedern lässt:

- Verkehrserzeugungsmodelle bestimmen das Aufkommen an Transportnachfrage  $d'$ , das durch wirtschaftliche Aktivitäten im Untersuchungsraum in einem Zeitraum erzeugt wird. Die Einheit der Transportnachfrage kann je nach Wirtschaftsverkehrssegment und Berechnungsmethode unterschiedlich ausfallen. Mögliche Einheiten sind beispielsweise Frachtonnen, Lkw-Fahrten oder Lieferaufträge (je Zeiteinheit). Ergebnis dieses Teilmodells ist die produzierte und angezogene Transportnachfrage eines Wirtschaftsverkehrssegmentes  $g$ .

produzierte  
Transportnachfrage  $d'$   
des Wirtschaftsver-  
kehrssegment  $g$  in  
Zelle  $o$ :

$$d'_{go}^p$$

angezogene  
Transportnachfrage  $d'$   
des Wirtschaftsver-  
kehrssegment  $g$  in  
Zelle  $d$ :

$$d'_{gd}^a$$

- Zielwahlmodelle ermitteln die Quellen  $o$  und die Ziele  $d$  der Transportnachfrage  $d'$  und somit die Transportnachfrage zwischen den Verkehrszellen  $o$  und  $d$ . Zur Berechnung werden i.d.R. Zielwahlmodelle verwendet, die auch in Personenverkehrsmodellen zu finden sind [111].

Transportnachfrage  $d'$   
des Wirtschaftsver-  
kehrssegmentes  $g$   
zwischen den Zellen  $o$   
und  $d$ :

$$d'_{god}$$

- Modelle zur Tourenbildung ermitteln die Ortsveränderungen von Fahrzeugen auf Basis der vorhandenen Transportnachfrage und spezieller Verhaltensdaten über Tourenfahrten, wie z.B. Anzahl der Stopps und abgearbeitete Transportnachfrage je Tour. Es erfolgt eine Generierung von Start-, Verbindungs- und Rückfahrten (zur Startzelle der Tour).

Ortsveränderungen  $d$   
des Wirtschaftsver-  
kehrssegmentes  $g$   
zwischen den Zellen  $o$   
und  $d$ :

$$d_{god}$$

- Routenwahl- oder Umlegungsmodelle ermitteln die Routen  $r$  im Verkehrsnetz und verteilen die Ortsveränderungen auf die Routen und damit auf die Netzelemente (Strecken, Knoten)  $s$  im Verkehrsnetz. Den Wirtschaftsverkehrssegmenten sind hier (Lkw-) Fahrzeugklassen zugeordnet. In diesem Teilmodell werden Personen- und Wirtschaftsverkehre gemeinsam betrachtet.

Ortsveränderungen  $d$   
des Wirtschaftsver-  
kehrssegmentes  $g$   
zwischen den Zellen  $o$   
und  $d$   
auf Route  $r$ :

$$d_{godr}$$

In der Umlegung werden die Nachfrage im Personen- und Wirtschaftsverkehr zusammengeführt, da beide Verkehre die vorhandenen Kapazitäten im Verkehrsraum gemeinsam nutzen. Hierbei muss beachtet werden, dass ein Fahrzeug des Güterverkehrs mehr Kapazität benötigt als ein Pkw. Eine Abbildung dieses Effektes kann durch eine Umrechnung der verschiedenen Lkw-Klassen in Pkw-Einheiten erfolgen.

Bei regionalen Nachfragemodellen wird für den Wirtschaftsverkehr i.d.R. auf eine Abbildung einer Moduswahl verzichtet. Es wird die ausschließliche Nutzung von Kraftfahrzeugen angenommen, da hier alternative Verkehrsmittel (Bahn, Schiff) keine Bedeutung haben.

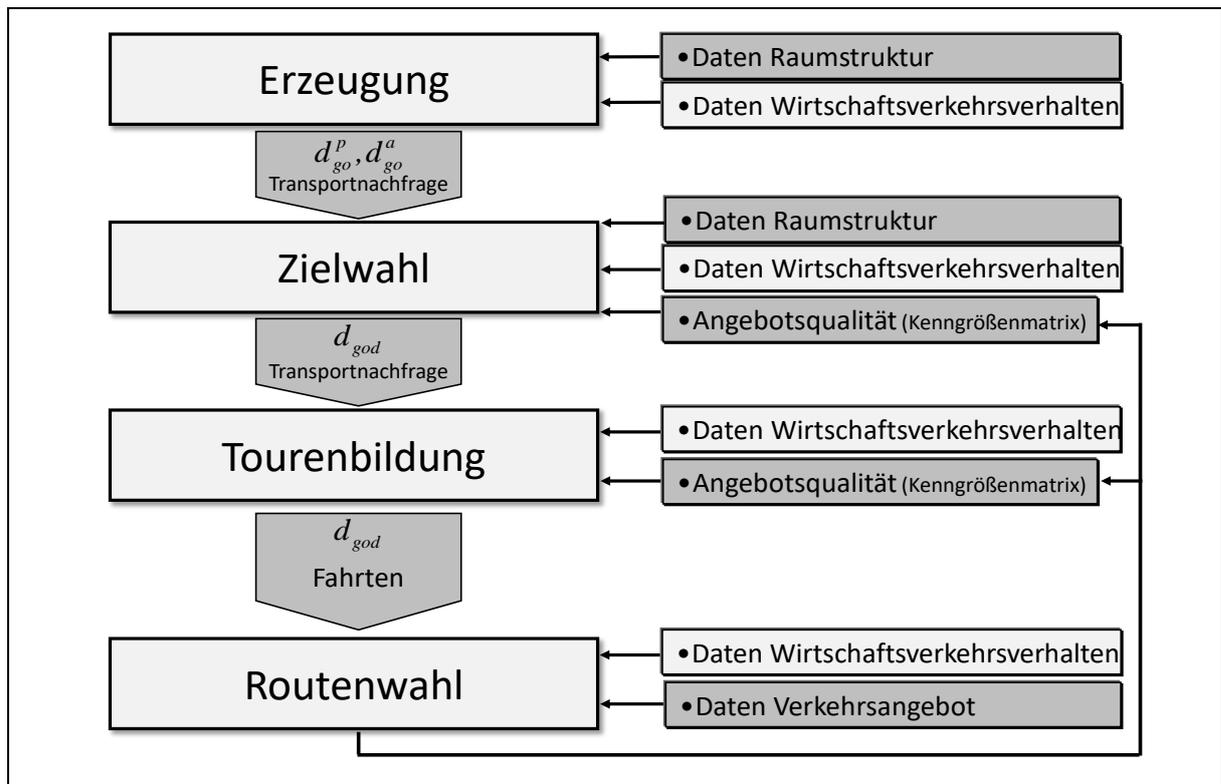


Abbildung 2-3: Ein Vier-Stufen Modell für den regionalen Wirtschaftsverkehr mit den wesentlichen Eingangsgrößen: Siedlungsstrukturdaten, Wirtschaftsverhaltensdaten, Verkehrsangebotsdaten (Bildquelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Friedrich [60]).

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, tritt im Wirtschaftsverkehr eine veränderte Struktur an Entscheidungsträgern auf. Um diese Struktur modelltechnisch abbildbar zu machen, werden im Vier-Stufen-Modell für den regionalen Wirtschaftsverkehr Siedlungsstruktur- und Verhaltensdaten verwendet, die für Wirtschaftsaktivitäten relevant sind (siehe Kapitel 6.2.3).

Für den Personenwirtschaftsverkehr können auf Grundlage entsprechender Daten wie im Personenverkehr aktivitätenhomogene Nachfragegruppen gebildet werden. Eine direkte Integration dieser Verkehre in ein Personenverkehrsmodell über beispielweise die Aktivität „Dienstweg“ ist somit möglich.

Für den Güterverkehr erfolgt eine Verknüpfung von Siedlungsstruktur- und Verhaltensdaten i.d.R. nicht über Personengruppen, sondern über Nachfragegruppen, die als Wirtschaftsverkehrssegment bezeichnet werden. Sie verbinden einen Wirtschaftszweig bzw. ein Transportgut mit entsprechenden Siedlungsstruktur- und Verhaltensdaten. Es wird dabei angenommen, dass innerhalb des Wirtschaftsverkehrssegment aufgrund der transportrelevanten Gütereigenschaften ein homogener Transport- und Logistikmarkt existiert, der ein ähnliches Entscheidungsverhalten erzeugt. Beispielhafte Siedlungsstrukturdaten sind die Anzahl der Beschäftigten oder Anzahl gewerblich genutzter Fahrzeuge (auch nach Fahrzeugklasse) in einer Verkehrszelle. Die Verhaltensdaten sind oft fahrzeugbezogen, wie z.B. die Erzeugungsraten je Lkw eines bestimmten Wirtschaftszweigs bzw. Transportgutes.

### 2.2.3.3 Zusammenfassung von Entscheidungen

Das Vier-Stufen Modell geht davon aus, dass die in den jeweiligen Stufen modellierten Entscheidungen sequentiell und damit unabhängig voneinander ablaufen. Das stellt eine starke Vereinfachung dar, die zu inkonsistenten Ergebnissen führen kann. Um zu berücksichtigen, dass die einzelnen Wahlentscheidungen i.d.R. nicht unabhängig voneinander sind, können Modellstufen integriert werden. Bei der Integration wird die Entscheidungsbildung so abgebildet, dass die Einflussfaktoren aller Teilentscheidungen eingehen. Mit dem Ziel einer Modellvereinfachung können Modellstufen auch zusammengefasst werden; üblich sind hierbei:

- Zusammenfassung von Ziel- und Moduswahl:  
Simultane Ziel- und Moduswahlmodelle berücksichtigen, dass die Zielwahl von den verfügbaren Verkehrsmodi abhängt. Personen, die über keinen Pkw verfügen, werden bei ihrer Zielwahl nur Ziele einbeziehen, die sie zu Fuß, mit dem Rad oder dem ÖV erreichen können.
- Zusammenfassung von Verkehrserzeugung und Moduswahl:  
Ausgehend davon, dass die persönlichen Eigenschaften einer Person, insbesondere die Pkw-Verfügbarkeit, die maßgebenden Kriterien für die Moduswahl sind, kann es sinnvoll sein, die Moduswahl in die Verkehrserzeugung zu integrieren. Modelle, die auf diesem Ansatz beruhen, werden Trip-End-Modelle genannt. Sie ermitteln den Anteil jedes Modus an der Verkehrsnachfrage auf der Ebene der Verkehrszellen in Abhängigkeit der modusspezifischen Erreichbarkeit und der Pkw-Verfügbarkeit der Nachfragegruppe.

### 2.2.3.4 Berücksichtigung weiterer Entscheidungen

Je nach Einsatzbereich des Verkehrsnachfragemodells kann es sinnvoll sein, weitere in Tabelle 2-1 dargestellte Entscheidungen modellseitig abzubilden:

- Standortwahl:  
Die Beschaffenheit der Siedlungsstruktur (Lokalisierung von Einwohnern, Nutzungen) kann im Analysefall aus statistischen Daten oder mittels Erhebungen erfasst werden. Im Bezugsfall hingegen sind Annahmen zur zukünftigen Raum- bzw. Flächennutzungsstruktur erforderlich. Diese Informationen können entweder aus externen Quellen übernommen (z.B. Bevölkerungsprognose, Regionalpläne, Flächennutzungspläne) oder mit Hilfe von Flächennutzungsmodellen abgeschätzt werden. Insbesondere in Situationen, in denen Rückwirkungen von Änderungen im Verkehrssystem auf die Siedlungsstruktur zu erwarten sind, bietet sich die Nutzung von Flächennutzungsmodellen an. Einige dieser Modelle verfolgen den Ansatz, die Wirkungen des Verkehrssystems auf die Siedlungsstruktur und umgekehrt (bekannt als „Land-Use Transport Interaction Cycle“) explizit zu beschreiben. Einschränkungen bezüglich der Aussagefähigkeit von Flächennutzungsmodellen in Ländern, in denen die Nutzung neuer Siedlungsflächen das Ergebnis komplexer politischer Entscheidungsprozesse ist, sollten beachtet werden.
- Fahrzeug- und Zeitkartenbeschaffungswahl:  
Die Verfügbarkeit eines Pkw oder einer Zeitkarte beeinflusst die Moduswahl und die Zielwahl. Verkehrsnachfragemodelle benötigen deshalb als Input Aussagen über den Anteil der Bevölkerung,

der über einem Pkw und über eine Zeitkarte verfügt. Für den Bezugsfall kann die zukünftige Verfügbarkeit aus externen Quellen übernommen werden oder mit einem eigenen Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodell prognostiziert werden. Dabei kann z.B. die Erreichbarkeit des Wohnstandorts mit dem ÖV als eine erklärende Variable herangezogen werden.

- **Abfahrtszeitwahl:**

Das Verhalten eines Verkehrsteilnehmenden kann von der tageszeitabhängigen Reisezeit abhängen und beispielsweise zu einer Ausdehnung der Hauptverkehrszeit (Peakspreading) führen. Im ÖV müssen die Verkehrsteilnehmenden das Fahrplanangebot bei der Abfahrtszeitwahl einbeziehen. Verkehrsnachfragemodelle können die Abfahrtszeitwahl durch die Vorgabe von wegezweckspezifischen Tagesganglinien oder durch spezifische Entscheidungsmodelle nachbilden.

### 2.2.3.5 Rückkopplung zwischen den Entscheidungen

Die Reisezeit kann die Zielwahl, die Moduswahl, die Abfahrtszeitwahl und die Routenwahl beeinflussen. Die Reisezeit im Kfz-Verkehr nimmt in Netzen mit einer hohen Auslastung zu. Hohe Auslastungen im Kfz-Verkehr können außerdem zu längeren Fahrtzeiten in der Hauptverkehrszeit und zu Verspätungen im ÖV führen. Verspätungen im ÖV können auch die Folge überlasteter ÖV-Fahrzeuge sein. Die Auswirkungen der Reisezeit auf die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden lässt sich durch das Einführen der in Abbildung 2-4 dargestellten Rückkopplung zwischen den Wahlentscheidungen und der Reisezeit abbilden. Die Reisezeit beeinflusst die Wahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmenden, die bestrebt sind ihren Zeitaufwand zu minimieren. Die Reisezeit wird wiederum maßgeblich von der Verkehrsstärke beeinflusst, die sich aus der Verkehrsnachfrage ergibt.

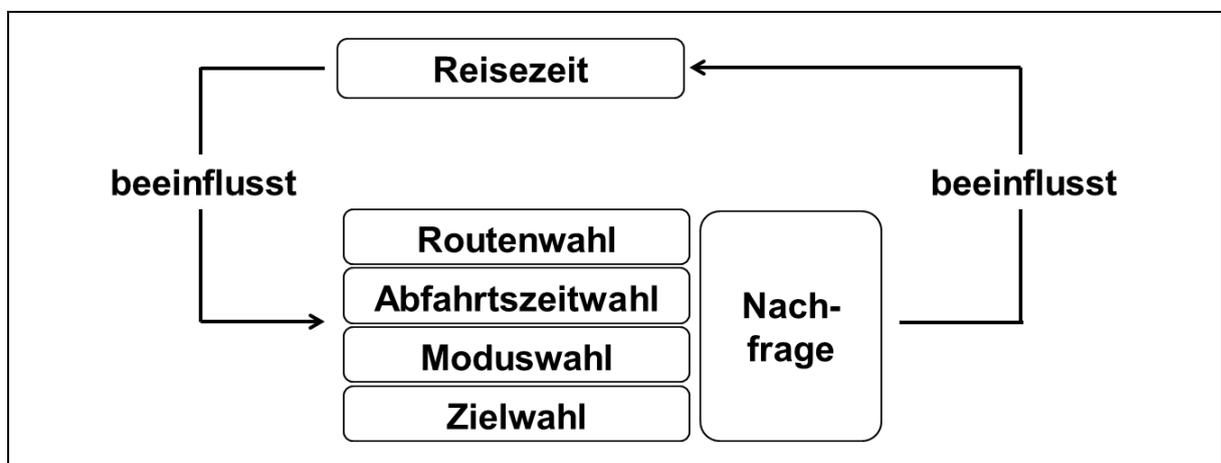


Abbildung 2-4: Rückkopplung zwischen Verkehrsnachfrage und Reisezeit (Bildquelle: Friedrich [60]).

Bei einer Rückkopplung der Modellstufen Zielwahl, Moduswahl und Routenwahl müssen die Modellstufen iterativ solange durchgeführt werden, bis sich im System ein Gleichgewichtszustand einstellt. Das ist dann der Fall, wenn sich die Struktur der Verkehrsnachfrage oder die Reisezeitmatrix zwischen zwei Iterationsschritten nicht mehr ändert. Für die Quantifizierung des Gleichgewichts werden Konvergenzmaße verwendet.

Agentenbasierte Ansätze (mikroskopische Ansätze, vgl. Kapitel 2.2.5) bilden die Entscheidungen einzelner Agenten (Verkehrsteilnehmende) auf individueller Ebene ab und können deshalb auch

Rückkopplungen auf individueller Ebene berücksichtigen. Die Verkehrsteilnehmenden passen ihre Entscheidungen autonom an, wodurch sich in Zusammenspiel mit den Entscheidungen der anderen Verkehrsteilnehmenden ein Verkehrszustand ergibt. Dieser wird mittels eines nutzenbasierten Ansatzes (vgl. Kapitel 2.2.2) bewertet, woraufhin die Verkehrsteilnehmenden ihre Entscheidungen in der nächsten Iteration verändern. Diese vielfach wiederholte Rückkopplung bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes lässt sich als Lernprozess interpretieren.

#### **2.2.4 Synthetische und inkrementelle Modelle**

Ein synthetisches Verkehrsnachfragemodell berechnet die Verkehrsnachfrage direkt aus den Siedlungsstrukturdaten, aus den Daten des Verkehrsangebots und aus Daten zum Mobilitätsverhalten. Es bildet dazu alle relevanten Entscheidungsprozesse (Tabelle 2-1) auf der Ebene von Einzelpersonen oder Personengruppen differenziert nach Wegezwecken ab. Im Netz gezählte Verkehrsstärken werden nur zur Validierung des Modells herangezogen.

Ein inkrementelles Modell berechnet die relative oder absolute Veränderung der Verkehrsnachfrage, d.h. es verwendet eine vorhandene beobachtete oder berechnete Matrix der Verkehrsnachfrage und verändert die Nachfragewerte. Inkrementelle Modelle existieren in unterschiedlichen Ausprägungen:

- Anpassung der Nachfragematrix aufgrund von Veränderungen im Verkehrsangebot, die zu veränderten Reiseaufwänden führen. (z.B. Reisezeitänderungen aufgrund von Ausbaumaßnahmen). Die Vorgehensweise erfordert Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Aufwandsänderungen und Verkehrsnachfrageänderungen in Form von Elastizitäten. Diese Vorgehensweise kann als Elastizitätsmodell oder Marginalmodell bezeichnet werden.
- Anpassung der Nachfragematrix durch die Berechnung der Nachfrageänderungen mit einem synthetischen Nachfragemodell. Die Nachfrageänderungen ergeben sich aus den absoluten oder relativen Änderungen der synthetisch berechneten Nachfragematrizen für den heutigen und den zukünftigen Zustand. Dieses Modell kann als kombiniertes Modell bezeichnet werden, da es ein inkrementelles Modell mit einem synthetischen Modell verknüpft.
- Anpassung der Nachfragematrix an geänderte Verkehrsaufkommenswerte in den Verkehrszellen (z.B. aufgrund von Änderungen bei den Siedlungsstrukturdaten). Die Matrix wird so angepasst, dass die Zeilen- und Spaltensummen mit den geänderten Verkehrsaufkommenswerten übereinstimmen.
- Anpassung der Nachfragematrix aufgrund von Abweichungen zwischen gezählten und modellierten Verkehrsstärken (z.B. Korrektur oder Fortschreibung einer Matrix an Zählwerte). Die Matrix wird über die Routen so angepasst, dass die gezählten und modellierten Verkehrsstärken übereinstimmen. In diese Modellklasse gehört auch die Hochrechnung beobachteter bzw. befragter Ortsveränderungen anhand von Zählwerten auf die Grundgesamtheit aller Ortsveränderungen.

Synthetische Modelle sind immer dann notwendig, wenn es deutliche Änderungen im Verkehrsangebot oder in der Siedlungsstruktur gibt, die eine grundsätzliche Änderung der Nachfragestruktur erwarten lassen. Die meisten inkrementellen Modelle eignen sich für Fälle, in denen die Änderungen im Verkehrsangebot oder in der Siedlungsstruktur klein sind. Kombinierte Modelle werden auch für Anwendungen mit größeren Änderungen eingesetzt.

### 2.2.5 Makroskopische und mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle

Das in einer Modellbeschreibung häufig verwendete Begriffspaar makroskopisch und mikroskopisch dient zur Beschreibung des Abstraktions- und Aggregationsgrads der in einem Modell verwendeten Objekte. Makroskopische Modelle fassen die Objekte der realen Welt in aggregierten Größen (z.B. Verkehrsstärke einer Strecke) zusammen. Mikroskopische Modelle bilden die Objekte der realen Welt direkt ab. Die Eigenschaften eines makroskopischen Objekts oder Zustands sollten sich aus den Eigenschaften der mikroskopischen Objekte oder Zustände erklären lassen:

- **Personen:**

In einem mikroskopischen Nachfragemodell werden die Personen im Untersuchungsraum als einzelne Objekte abgebildet. Eine Person, die oft als Agent bezeichnet wird, wird durch eine Reihe von Attributen beschrieben (z.B. Wohnort, Arbeitsort, Pkw-Besitz). Ein makroskopisches Nachfragemodell differenziert die Nachfrage inhaltlich nach Personengruppen und räumlich nach Verkehrszellen.
- **Wahlentscheidungen, Ortsveränderungen und Verkehrsstärken:**

In mikroskopischen Nachfragemodellen treffen Agenten Entscheidungen. In einer Entscheidungssituation wählen sie aus einer Menge von Alternativen genau eine Alternative, z.B. einen bestimmten Modus. Ein mikroskopisches Modell liefert daher als (Zwischen-) Ergebnis einzelne Ortsveränderungen einzelner Personen. Für jede Ortsveränderung können folgende Attribute für weitere Auswertungen protokolliert werden: Agentennummer, Wegezweck, Quelle, Ziel, Modus, Route. In makroskopischen Nachfragemodellen werden Alternativen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit gewählt. Diese Modelle ermitteln nicht individuelle Ortsveränderungen, sondern die Menge der Ortsveränderungen zwischen Verkehrszellen und Verkehrsstärken auf Routen. Um die Verkehrsstärke auf einem Netzelement zu bestimmen, werden im mikroskopischen Modell alle Agenten, die das Netzelement benutzen, addiert. Im makroskopischen Modell wird über die Verkehrsstärken aller Routen, die über das Netzelement führen, aufsummiert. Verkehrsstärken eines mikroskopischen Modells sind immer ganzzahlig, Verkehrsstärken eines makroskopischen Modells sind dagegen reelle Zahlen.
- **Verkehrszustand:**

Ein mikroskopisches Modell kann die Position und die Geschwindigkeit jedes einzelnen Fahrzeuges bestimmen. Makroskopische Modelle ermitteln eine mittlere Geschwindigkeit aus der Verkehrsstärke.
- **Erfahrung und Gedächtnis:**

In makroskopischen Modellen werden aktuelle oder historische Reisezeiten in einer Kenngrößenmatrix auf der Ebene der Quelle-Ziel-Relationen oder in der Umlegung auf der Ebene von Routen gespeichert. Alle Personen greifen, unabhängig von der Personengruppe, auf dieselben Reisezeiten zurück. In mikroskopischen Modellen kann jeder Agent auf ein eigenes Gedächtnis zurückgreifen, in dem Erfahrungen (z.B. Reisezeiten) aus vorangegangenen Tagen gespeichert werden und bei späteren Entscheidungen als Erfahrungswerte mit einfließen.
- **Verkehrsangebot:**

Netzelemente, die das Verkehrsangebot definieren, können mit unterschiedlichem

Detailierungsgrad abgebildet werden. Das Angebot im ÖV kann beispielsweise durch ein vereinfachtes Liniennetz mit Fahrtzeiten oder durch den exakten Fahrplan hinterlegt werden. Der gewählte Detailierungsgrad beeinflusst dann die Qualität des Choice Sets, d.h. die Menge geeigneter Alternativen für die Routen- und Moduswahl. Welcher Detailierungsgrad angemessen ist, hängt dabei weniger davon ab, ob die Verkehrsnachfrage makroskopisch oder mikroskopisch modelliert wird, sondern vom Einsatzbereich des Modells.

Makroskopische Nachfragemodelle produzieren in einem Berechnungslauf mit Rückkopplungen eine eindeutige Lösung. Das ist ein wichtiger Vorteil gegenüber mikroskopischen Nachfragemodellen. Mikroskopische Modelle erfordern, sofern sie korrekt eingesetzt werden, eine hohe Anzahl von Berechnungsläufen, um ein statistisch abgesichertes Ergebnis zu liefern (eine Methode zur Bestimmung der notwendigen Anzahl an Berechnungsläufen findet sich in den „Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ [47]). Da makroskopische Modelle keine Einzelpersonen modellieren, stehen entscheidungsrelevante Attribute der einzelnen Verkehrsteilnehmenden sowie Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden aus vorherigen Modellstufen nicht zur Verfügung (z.B. ist bei der Routenwahl nicht bekannt, ob der Verkehrsteilnehmende die Route (ggf. innerhalb einer Umweltzone) mit seinem Fahrzeug befahren darf). Makroskopische Modelle können weder Aussagen zur Position von Personen im Netz machen noch Entscheidungen im Kontext des Haushalts (z.B. welche Person nutzt das Fahrzeug des Haushalts) abbilden.

### **2.2.6 Statische und dynamische Modelle (Berücksichtigung zeitlicher Veränderlichkeiten)**

Modelle ohne Berücksichtigung zeitlicher Veränderungen werden als statische Modelle bezeichnet (z.B. Tagesmodell oder Spitzenstundenmodell). Für die Modelldaten werden über den gesamten Betrachtungszeitraum vereinfachend Mittelwerte verwendet. Diese werden damit als konstant angenommen:

- Nachfrage: Nachfrage eines Zeitraums.
- Kapazität einer Verkehrsanlage: mittlere Kapazität eines Zeitraums.
- ÖV-Angebot: mittlere Fahrtzeit und mittlerer Takt eines Zeitraums.
- Reisezeiten: mittlere Reisezeiten eines Zeitraums.

Modelle mit Berücksichtigung zeitlicher Veränderung werden als dynamische Modelle bezeichnet (z.B. Modell mit 24 Stunden-Zeiträumen):

- Nachfrage: Nachfrage differenziert nach Tageszeiträumen (z.B. Stunden).
- Kapazität einer Verkehrsanlage: Kapazität einer Stunde.
- ÖV-Angebot: genauer Fahrplan.
- Reisezeiten: Reisezeiten differenziert nach Tageszeiträumen.

Es kann sinnvoll sein, beide Ansätze in einem Modell zu kombinieren, z.B. um die mittleren ÖV-Reisezeiten eines Tages aus dem Fahrplan zu berechnen.

### 2.2.7 Einzelweg- und Wegekettenmodelle

Im Zuge einer Aushäusigkeit werden häufig mehrere Aktivitäten nacheinander erledigt, ohne dass der Betreffende zwischendurch zur Wohnung zurückkehrt (z.B. Wohnen – Arbeiten – Einkaufen – Wohnen). Dadurch entstehen Aktivitätenketten. Durch die Wahl von Aktivitätenorten werden diese Aktivitätenketten dann in Wegeketten überführt. Je nachdem wie die Aktivitätenketten modelliert werden, können folgende Nachfragemodelle unterschieden werden:

- *Aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle* bestimmen die Ortsveränderungen zwischen zwei Verkehrszellen ohne dabei den Kontext der einzelnen Ortsveränderung innerhalb der Wegeketten der betreffenden Personen zu berücksichtigen. Die tatsächlichen Wegeketten werden in Teilketten mit genau einem Weg, d.h. mit einer Quelle und einem Ziel unterteilt. Lohse & Schnabel [111] bezeichnet die Teilketten einer Aktivitätenkette als Quelle-Ziel-Gruppen. Eine Quelle-Ziel-Gruppe wird durch die Aktivität an der Quelle und durch die Aktivität am Ziel beschrieben (z.B. „Wohnen – Arbeiten“). Hierbei werden heimatgebundene Gruppen und nicht heimatgebundene Gruppen (z.B. „Arbeiten – Einkaufen“) unterschieden. Aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle erfordern Verkehrserzeugungsmodelle, die sicherstellen, dass für jede Zelle die Zahl der produzierten und angezogenen Wege gleich ist. Wegebasierte Verkehrsnachfragemodelle können zu inkonsistenten Ergebnissen kommen, wenn sich aufgrund einer unterschiedlichen Angebotsqualität in der Hin- und in der Rückrichtung unterschiedliche Modal-Split-Werte für die beiden Richtungen ergeben.
- *Aktivitätenkettenmodelle* betrachten im Gegensatz dazu die gesamte Rundtour einer Person vom Verlassen der Wohnung bis zur Rückkehr mit allen zugehörigen Wegen. Ausgangspunkt der Modellierung sind vorgegebene Aktivitätenketten mit ihren auftretenden Häufigkeiten. Bei der Zielwahl wird dann jeder Aktivität der Kette ein Aktivitätenort zugewiesen und so in eine Wegekette mit Ortsbezug überführt. Aktivitätenkettenmodelle bilden die Zielwahl und die Moduswahl im Kontext der gesamten Aktivitätenkette nach. Unplausible Verkehrsmittelübergänge werden in Aktivitätenkettenmodellen ausgeschlossen. Verkehrsteilnehmende, die eine Wegekette mit dem Pkw als Selbstfahrer beginnen, können in Aktivitätenkettenmodellen nicht mit dem ÖV zurückkehren. Eine Wegekette kann aber als Pkw-Mitfahrer beginnen und mit dem ÖV enden.
- *Tagesplanbasierte Modelle* (z.B. Axhausen & Gärling [4], Balmer et al. [6] oder Raney & Nagel [102]) erweitern Aktivitätenkettenmodelle um die Entscheidungen über die Dauer und Reihenfolge von Aktivitäten. Sie werden im Englischen als Activity Scheduling Models bezeichnet und können nur in mikroskopische Nachfragemodelle integriert werden.

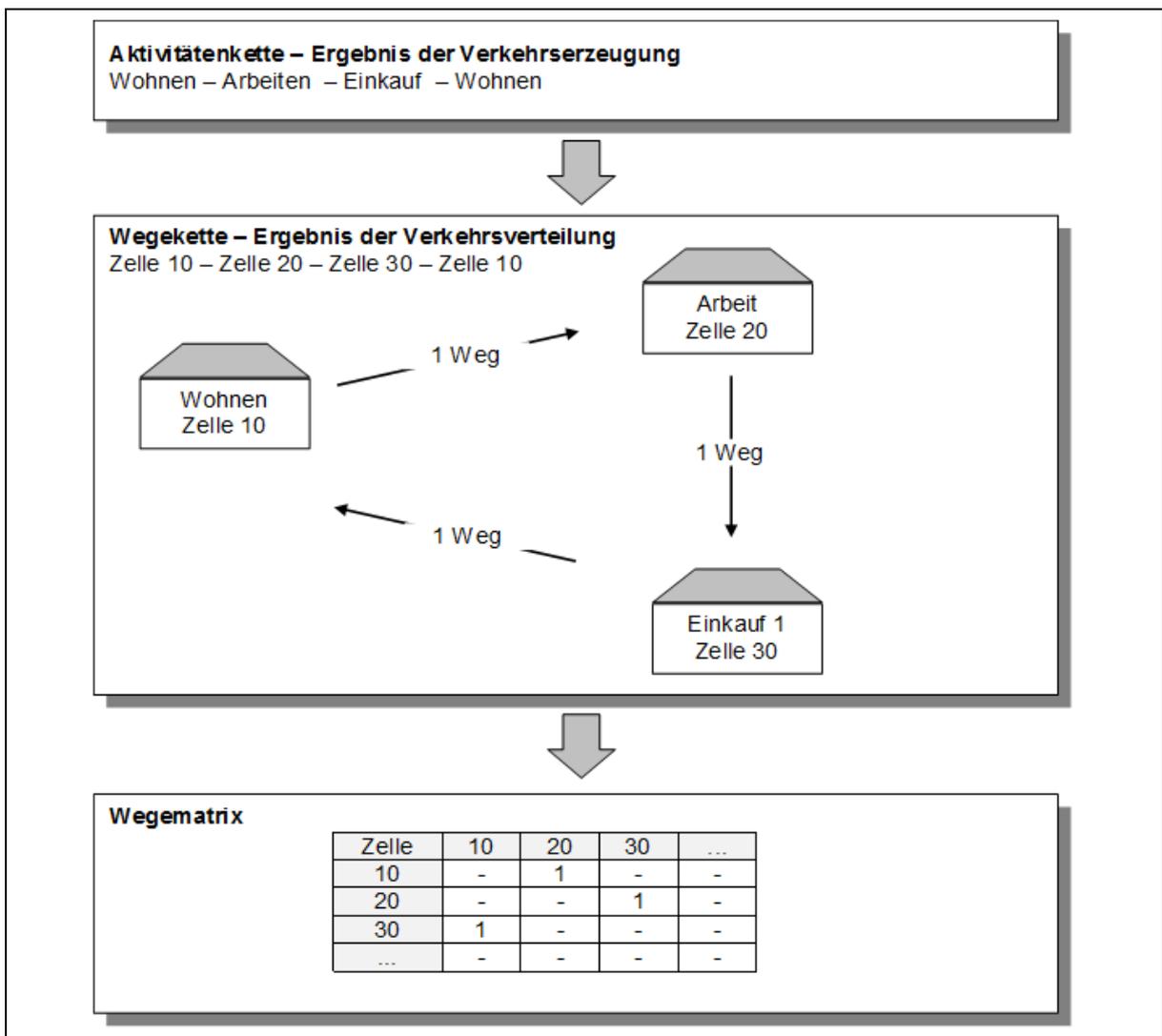


Abbildung 2-5: Zusammenhang zwischen Aktivitätenkette, Wegekette und Nachfragematrix. (Bildquelle: Friedrich [60]).

- *Tourenbasierte Modelle* werden in der Wirtschaftsverkehrsmodellierung eingesetzt. Die grundlegende Annahme hinter den Modellen ist, dass ein Großteil der Transportnachfrage im Rahmen von Touren erfüllt wird [43], deren Komplexität und Charakteristik vereinfacht je nach Wirtschaftszweig bzw. Transportgut variieren kann. Um diese zusätzliche Dimension des Wirtschaftsverkehrs abzubilden, erfolgt im Fall der tourenbasierten Modelle nach der Zielwahl der Transportnachfrage eine Generierung von Start-, Verbindungs- und Rückfahrten (zur Startzelle der Tour). Die Generierung der Verbindungsfahrten ist dabei getrennt für einzelne Startverkehrszellen durchzuführen.

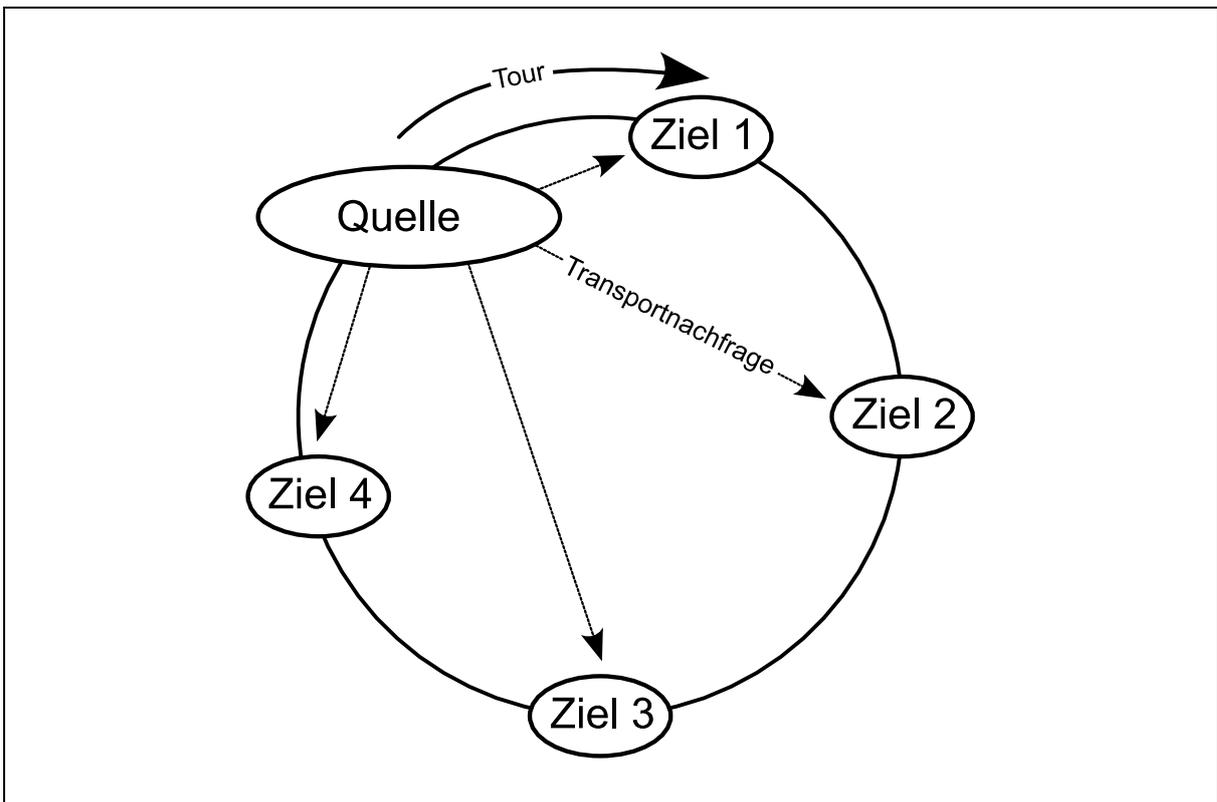


Abbildung 2-6: Zusammenhang zwischen Transportnachfrage und Tour (eigene Darstellung nach Lohse & Schnabel [111]).

## 2.3 Struktur eines Verkehrsnachfragemodells

### 2.3.1 Untersuchungsraum

Ein Verkehrsnachfragemodell wird eingesetzt, um den Verkehr in einem Untersuchungsraum abzubilden, der sich aus zukünftigen Entwicklungen und Maßnahmen ergibt. Der in einem Verkehrsnachfragemodell abgebildete Verkehr setzt sich aus den in Abbildung 2-7 dargestellten Komponenten zusammen:

- Wege mit Quelle und Ziel im Untersuchungsraum (Binnenverkehr des Untersuchungsraums): Diese Wege werden in der Regel vollständig mit dem Modell berechnet.
- Wege mit Quelle oder Ziel im Untersuchungsraum (Quell- und Zielverkehr des Untersuchungsraums): Diese Wege werden in der Regel aus externen Datenquellen (übergeordnetes Modell) übernommen.
- Wege mit Quelle und Ziel außerhalb des Untersuchungsraums (Durchgangsverkehr und Außenverkehr des Untersuchungsraums): Diese Wege werden in der Regel aus externen Datenquellen (übergeordnetes Modell) übernommen.

Viele verkehrliche Maßnahmen wirken in einem Raum, der größer ist als der Raum, in dem die Maßnahme umgesetzt wird. Deshalb wird in einem Verkehrsnachfragemodell zwischen einem Planungsraum und einem Untersuchungsraum unterschieden. Der Planungsraum umfasst den Raum, in dem Maßnahmen untersucht werden. Der Untersuchungsraum beinhaltet neben dem Planungsraum den Einflussraum, in dem die Maßnahmen Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage haben. Der

Außenraum dient zur Abbildung der verkehrlichen Interaktion des Untersuchungsraums mit dem Rest der Welt.

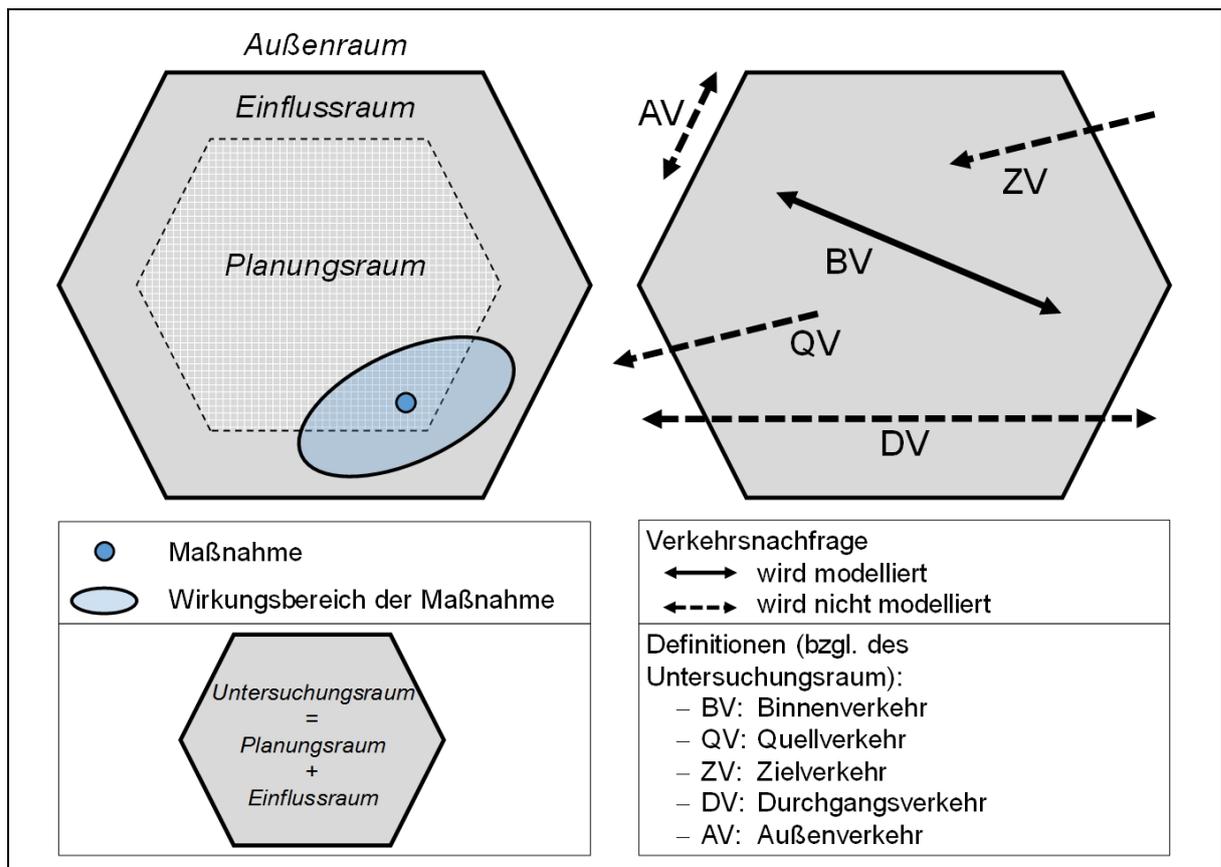


Abbildung 2-7: Räume und Verkehrsarten in einem Verkehrsnachfragemodell.

### 2.3.2 Bestandteile eines Verkehrsplanungsmodells

Abbildung 2-8 zeigt ein Verkehrsnachfragemodell als Bestandteil eines umfassenderen Verkehrsplanungsmodells. Der Kern des Verkehrsnachfragemodells ist im Bild durch einen fetten Rahmen markiert. Es ist Teil des Wirkungsmodells Ortsveränderungen, das die Entscheidungsprozesse nachbildet, die zu Ortsveränderungen führen. Auch die Datenmodelle, in denen die Eingangsdaten abgespeichert werden, sind in gewisser Weise Bestandteil eines Verkehrsnachfragemodells:

- Das *Datenmodell Mobilitätsverhalten* umfasst alle Daten, die das Mobilitätsverhalten der Bevölkerung beschreiben. Als Datenquelle dienen Haushaltsbefragungen mit Wegetagebüchern, die Informationen über das Mobilitätsverhalten der Befragten liefern (Aktivitätenketten, Reiseweiten, Reisezeiten, gewählte Verkehrsmittel). Bei einem Güterverkehrsmodell enthält das Datenmodell alle Daten zu logistischen Entscheidungen der Unternehmen (Anzahl Touren, Tourenlänge, Transportketten).
- Das *Datenmodell Verkehrsangebot*, oft als Netzmodell bezeichnet, enthält die Daten des Verkehrsangebotes einschließlich der Kosten für die Benutzung des Verkehrsangebots. Es besteht u.a. aus Knoten bzw. Haltestellen, den Strecken des Straßen- und Schienennetzes und aus den ÖV-Linien mit ihren Fahrplänen. Aber auch Steuerungseinrichtungen wie Lichtsignalanlagen, Nutzungskosten oder Fahrzeuge mit ihren spezifischen Eigenschaften (z.B. Kapazität, Kraftstoffverbrauch) sind Teil des Verkehrsangebots und können bei Bedarf im Datenmodell

Verkehrsangebot abgebildet werden. Im Güterverkehr sind zusätzlich die Standorte von Güterverkehrseinrichtungen Bestandteil des Verkehrsangebots (z.B. Logistik-Hubs, Rangierbahnhöfe).

- Das *Datenmodell Siedlungsstruktur* umfasst alle Daten, die die Bevölkerungsstruktur (z.B. Anzahl Einwohner, Alter) und die Verteilung der Nutzungen (Standorte von Wohnungen, Arbeitsplätzen, Schulen, Einkaufsgelegenheiten, Freizeitstätten) beschreiben. Diese Daten können in Form von Gebäudedaten oder in der Form von Verkehrszellen vorliegen. Im Güterverkehr umfasst das Datenmodell die Standorte von Versendern und Empfängern.
- Das *Wirkungsmodell Ortsveränderungen* ermittelt aus den Strukturdaten, den Verhaltensdaten und aus den Daten des Verkehrsangebots die Ortsveränderungen im Personen- und Güterverkehr. Im Personenverkehr bildet es dazu die verkehrsrelevanten Entscheidungsprozesse der Menschen nach, im Güterverkehr die Entscheidungsprozesse der Versender und Logistikdienstleister. Dieser Teil eines Verkehrsplanungsmodells wird *Verkehrsnachfragemodell* genannt.
- Das *Wirkungsmodell Verkehrsauswirkungen* ermittelt die Wirkungen, die sich direkt als Folge der Ortsveränderungen ergeben oder die indirekt dadurch entstehen, dass das Verkehrsangebot in Form von Verkehrswegen oder Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden muss.
- Die *Ergebnisse der Wirkungsmodelle* sind die Eingangsdaten für die *Bewertungsmodelle*. Die Bewertungsmodelle bewerten zum einen die Qualität des Verkehrsangebots aus Sicht der Nutzer. Zum anderen bewerten sie die Auswirkungen des Verkehrs auf die Betreiber des Verkehrsangebots, auf die Gesellschaft, die Wirtschaft und die Umwelt. Sie definieren eine Zielfunktion für die Optimierung.
- *Optimierungsmodelle* verändern den Input der Wirkungsmodelle so, dass sich eine möglichst optimale Lösung ergibt. Veränderbare Inputvariablen sind im Wesentlichen die Ausprägungen des Verkehrsangebots und die Verteilung der Nutzungen im Raum.

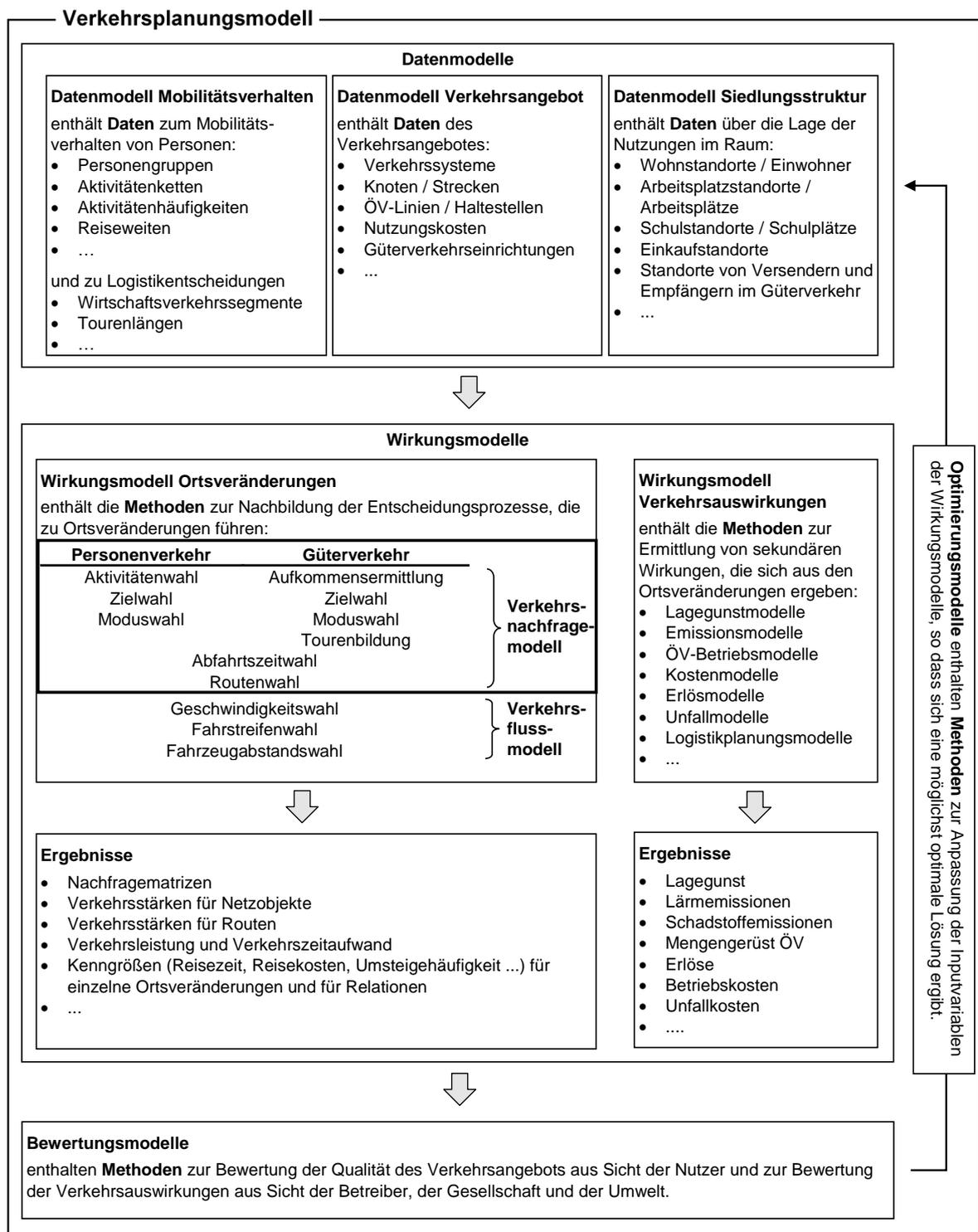


Abbildung 2-8: Aufbau eines Verkehrsplanungsmodells (Bildquelle: in Anlehnung an Friedrich [59]).

### 2.3.3 Variablen und Parameter eines Verkehrsnachfragemodells

Bei der Modellierung ist es wichtig zwischen den Variablen und den Parametern des Modells zu unterscheiden.

#### Variablen

Die Variablen eines Verkehrsnachfragemodells umfassen Größen, die sich im Laufe der Zeit verändern (z.B. Bevölkerungsstruktur oder Energiepreise) oder die durch planerische Entscheidungen (z.B. ein neues Siedlungsgebiet, eine neue Straße, eine neue ÖV-Linie, Gebühren für die Nutzung von Straßen, Parkplätzen und öffentlichen Verkehrsmitteln) gesetzt werden:

- Variablen des Verkehrsangebots: Wesentliche Variablen des Verkehrsangebots sind die Netzelemente mit ihren jeweiligen Eigenschaften (Fahrzeit, Fahrstreifen, Nutzungsgebühren). Sie beeinflussen die Widerstände für Ortsveränderungen und damit die Verkehrsnachfrage.
- Variablen der Siedlungsstruktur: Wesentliche Variablen der Siedlungsstruktur sind die Einwohner und die sonstigen Nutzungen, die den Einwohnern als Aktivitätenorte dienen. Um die Einwohner einer Personengruppe zuordnen zu können, sind außerdem das Alter und soziodemografische Eigenschaften wichtige Variablen.

Die Variablen des Analysefalls müssen auf geeignete Weise erfasst werden. Bei geplanten Maßnahmen sind die Variablen für zukünftige Zustände das Ergebnis des Planungsprozesses. Änderungen bei den Variablen, die sich aus externen Entwicklungen ergeben, müssen prognostiziert werden.

#### Parameter

Parameter sind die Stellschrauben des Modells, mit deren Hilfe das Modell bei der Modellerstellung an die Realität angepasst wird. Sie werden vom Modellersteller beim Modellaufbau festgelegt. Nach Abschluss der Modellerstellung sollen die Parameter nicht mehr verändert werden. Ein Verkehrsnachfragemodell umfasst mehrere Arten von Parametern:

- Empirisch begründete Parameter, die aus Verkehrserhebungen abgeleitet werden können. Beispiele hierfür sind Produktions- oder Anziehungsraten.
- Gesetzte Parameter, die aufgrund mangelnder empirischer Grundlagen aus der Literatur oder aufgrund von Erfahrungen angenommen werden. Beispiele hierfür sind die Parameter der CR-Funktion<sup>2</sup> oder der Widerstandsfunktion bei der Routenwahl.
- Eigenschaften des Netzmodells, z.B. Zellengröße, Zahl und Lage von Anbindungsknoten und Hochrechnungsfaktor von Stunden- auf Tageskapazitäten.
- Eigenschaften des Nachfragemodells, z.B. Zahl der Personengruppen und Wegezwecke.

---

<sup>2</sup> Eine CR-Funktion (Capacity-Restrain-Funktion) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Auslastung und der Fahrzeit einer Strecke im Kfz-Verkehr.

### 2.3.4 Ergebnisse eines Verkehrsnachfragemodells

Ein Verkehrsnachfragemodell liefert Kenngrößen der Nachfrage und Kenngrößen der Angebotsqualität auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ebenen.

#### Relationsbezogene Ergebnisse

Relationsbezogene Ergebnisse werden in Form von Matrizen abgespeichert. Dabei werden Kenngrößen- und Nachfragematrizen unterschieden:

- Kenngrößenmatrizen enthalten Werte, die den Aufwand für eine Ortsveränderung zwischen Verkehrszellen quantifizieren. Typische Aufwände sind Zeiten, Kosten und Umsteigehäufigkeiten. Kenngrößenmatrizen beschreiben so die Qualität eines Verkehrsangebots.
- Nachfragematrizen (auch Wegematrix, Fahrtenmatrix oder Verkehrsstrommatrix genannt) enthalten die Menge von Ortsveränderungen zwischen Verkehrszellen (siehe Abbildung 2-9).

Die Inhalte von Kenngrößen- und Nachfragematrizen müssen durch eine Menge von Merkmalen (Modus, Personengruppe, Wegezweck, Zeitraum) spezifiziert werden.

nach $d$ von $o$	$1$ ... $d$ ... $Z$	$\Sigma$ produziert
$1$ ... $o$ ... $Z$	$d_{11}$   $d_{od}$   $d_{ZZ}$	$d_1^p$  $d_o^p = \sum_{d \in Z} d_{od}$  $d_z^p$
$\Sigma$ angezogen	$d_1^a$ $d_d^a = \sum_{o \in Z} d_{od}$ $d_z^a$	Gesamtverkehr = $\Sigma$ produzierter Verkehr = $\Sigma$ angezogener Verkehr $d = \sum_{o \in Z} d_o^p = \sum_{d \in Z} d_d^a$  $= \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}$
$d_{od}$	Verkehrsnachfrage der Verkehrsbeziehung von Zelle $o$ nach Zelle $d$	
$d_z^p$	produzierter Verkehr der Zelle $z$ , d.h. Ortsveränderungen mit Quelle in Zelle $z$	
$d_z^a$	angezogener Verkehr der Zelle $z$ , d.h. Ortsveränderungen mit Ziel in Zelle $z$	
$d$	Gesamtverkehr der Matrix $D$	
$Z$	Menge der Verkehrszellen	

Abbildung 2-9: Aufbau einer Nachfragematrix.

### **Netzelementbezogene Ergebnisse**

Netzelementbezogene Ergebnisse umfassen die Modellergebnisse, die sich auf einzelne Netzelemente beziehen. Wichtige Netzelemente sind:

- Strecken und Abbieger: Verkehrsstärke, Auslastung, Fahrtzeit.
- Haltstellen: Verkehrsstärken für Ein-, Aus- und Umsteiger, Wartezeiten.
- Linien: Einsteiger, Aussteiger, Fahrgäste, Personenkilometer, Auslastung.

### **Verkehrszellenbezogene Ergebnisse**

Ergebnisse auf der Ebene von Verkehrszellen umfassen u.a.:

- Zahl der produzierten und angezogenen Wege.
- Modal-Split-Anteile.
- Mittlere Aufwände zur Erreichung der Verkehrszelle für eine Erreichbarkeitsanalyse

### **Aggregierte Ergebnisse**

Aggregierte Ergebnisse umfassen Kenngrößen für das gesamte Untersuchungsgebiet, für Teilräume oder Mengen von Netzelementen (z.B. für ein ÖV-Verkehrssystem oder für eine Straßenklasse).

Typische Kenngrößen sind:

- Verkehrsaufkommen: Zahl der Ortsveränderungen.
- Verkehrsleistung: Personen- und Fahrzeugkilometer.
- Verkehrszeitaufwand: Personen- und Fahrzeugstunden.
- Modal-Split-Anteile.

### **Zeitliche Differenzierung der Ergebnisse**

Ein Verkehrsnachfragemodell liefert in der Regel Ergebnisse für einen ganzen Tag (Tagesmodell).

Dynamische Modelle können auch zeitlich differenzierte Ergebnisse bereitstellen.

### 3 Stand der Forschung und Praxis bei der Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen

Zur Verkehrsnachfragemodellierung gibt es eine Vielzahl von Lehrbüchern (z.B. Ortúzar & Willumsen [94], Lohse & Schnabel [111] und Wermuth [136]), Handbücher von Softwareherstellern (z.B. PTV [100]) und wissenschaftliche Veröffentlichungen. Ziel dieses Kapitels ist eine Analyse der Literatur zur Nachfragemodellierung im Hinblick auf zwei Fragestellungen:

1. Gibt es Aussagen zu Anforderungen an den Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen?
2. Gibt es Aussagen zu Anforderungen an die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen?

Zur Beantwortung der Fragen werden zum einen nationale und internationale Forschungsberichte (Kapitel 3.2), Richtlinien und Leitfäden (Kapitel 3.3) analysiert. Zum anderen werden öffentlich zugängliche Unterlagen zu Ausschreibungen von Verkehrsnachfragemodellen in Deutschland ausgewertet (Kapitel 3.4). Zu Beginn wird in Kapitel 3.1 ein tabellarischer Überblick über die wesentlichen Aussagen der Veröffentlichungen gegeben.

#### 3.1 Überblick

Tabelle 3-2 gibt einen Überblick über die wesentlichen Aussagen zum Aufbau und zur Qualität von Verkehrsnachfragemodellen, die sich in den analysierten Veröffentlichungen finden. Die Tabelle enthält 5 Spalten:

- Spalte 1 benennt die Quelle, das Jahr und den Umfang der Veröffentlichung
- Spalte 2 gibt an, ob die Veröffentlichung Aussagen zum Einsatzbereich des Modells, zum Wirtschaftsverkehr, zu Haushaltsbefragungen, zur Prognose und zur Dokumentation macht.
- Spalte 3 gibt an, ob die Veröffentlichung Vorgaben zum Netzmodell, d.h. zu den Verkehrszellen, zur Abbildung des Verkehrsangebots und zur Abgrenzung des Untersuchungsraums enthält.
- Spalte 4 gibt an, ob die Veröffentlichung Vorgaben zur Modellstruktur, d.h. zu Personengruppen, Wegezwecken, Verkehrsmitteln und Modellstufen enthält.
- Spalte 5 gibt an, ob die Veröffentlichung Aussagen zu Qualitätskenngrößen (Wie wird Qualität gemessen?) und Zielwerten (Wird ein Mindestwert für die Qualitätskenngröße vorgegeben?) enthält.

Die in der Tabelle 3-2 verwendeten Abkürzungen sind in der Tabelle 3-1 erläutert.

Einsatzbereich Wirtschaftsverkehr HH-Befragung Prognose Dokumentation		Vorgaben Netzmodell	Vorgaben Modellstruktur	Qualitätskenngrößen			
EB	Einsatzbereich Werden konkrete Einsatz- / Maßnahmenbereiche definiert?	ZE	Verkehrszellen Werden Kriterien für die Zellengröße, die Anzahl der Einwohner pro Zelle etc. definiert?	PG	Personengruppen Gibt es Anforderungen an die Abbildung von Personengruppen?	ERZ	Erzeugung Werden Qualitätsanforderungen an die Verkehrserzeugung gestellt? Antwortoptionen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• K: Es werden spezifische Kenngrößen definiert.</li> <li>• W: Es werden Zielwerte definiert.</li> </ul>
WV	Wirtschaftsverkehr Werden Anforderungen für den Wirtschaftsverkehr definiert?	IVA	Verkehrsangebot IV Gibt es Anforderungen an die Abbildung des IV-Angebots?	WZ	Wege Zwecke Gibt es Anforderungen an die Abbildung von Wegezwecken?	ZW	Zielwahl Werden Qualitätsanforderungen an die Zielwahl gestellt? Antwortoptionen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• K: Es werden spezifische Kenngrößen definiert.</li> <li>• W: Es werden Zielwerte definiert.</li> </ul>
HHB	Haushaltsbefragung Wird die Durchführung einer Haushaltsbefragung gefordert?	ÖVA	Verkehrsangebot ÖV Gibt es Anforderungen an die Abbildung des ÖV-Angebots?	VM	Verkehrsmittel Gibt es Anforderungen an die Abbildung von Verkehrsmitteln und Modi?	MW	Moduswahl Werden Qualitätsanforderungen an die Moduswahl gestellt? Antwortoptionen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• K: Es werden spezifische Kenngrößen definiert.</li> <li>• W: Es werden Zielwerte definiert.</li> </ul>
Prog	Prognose Werden Anforderungen für Prognose benannt?	UR	Untersuchungsraum Werden Anforderungen an den Untersuchungsraum definiert?	MS	Modellstufen Werden Anforderungen an die abzubildenden Modellstufen und deren Hierarchie definiert?	VS	Verkehrsstärken Werden Qualitätsanforderungen an die modellierten Verkehrsstärken gestellt? Antwortoptionen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• K: Es werden spezifische Kenngrößen definiert.</li> <li>• W: Es werden Zielwerte definiert.</li> </ul>
Doku	Dokumentation Werden Anforderungen für die Dokumentation definiert?					RZ	Reisezeiten Werden Qualitätsanforderungen an die modellierten Reisezeiten gestellt? Antwortoptionen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• K: Es werden spezifische Kenngrößen definiert.</li> <li>• W: Es werden Zielwerte definiert.</li> </ul>
						Konv	Konvergenz Werden Qualitätsanforderungen an die zu erreichende Konvergenz bei Umlegung und / oder Rückkopplung gestellt? Antwortoptionen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• K: Es werden spezifische Kenngrößen definiert.</li> <li>• W: Es werden Zielwerte definiert.</li> </ul>
						Test	Spezielle Tests Werden spezielle Tests zur Prüfung des Modellverhaltens durchgeführt? <b>Antwortoptionen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• S: Sensitivitätstests</li> <li>• R: Realitätstests</li> </ul>

Tabelle 3-1: Verwendete Abkürzungen für die Analyse der Veröffentlichungen.

Quelle Jahr Umfang	Einsatzbereich Wirtschaftsverkehr HH-Befragung Prognose Dokumentation	Vorgaben Netzmodell	Vorgaben Modellstruktur	Qualitätskenngrößen
Forschungsprojekt Analyse der Anwendung von Verkehrsnachfrage modellen  D, 2001 Seiten 71	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input checked="" type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input type="checkbox"/>	ZE <input type="checkbox"/> IVA <input type="checkbox"/> ÖVA <input type="checkbox"/> UR <input type="checkbox"/>	PG <input checked="" type="checkbox"/> WZ <input type="checkbox"/> VM <input type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ - ZW - MW - VS - RZ - Konv - Test -
Forschungsprojekt QUALIMOD  D, 2008 Seiten 101	EB <input type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input type="checkbox"/> VM <input type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ K ZW K MW K VS K RZ - Konv - Test -
Forschungsprojekt Datenan- forderungen an die Weiterentwicklung kleinräumiger Verkehrsnachfrage modelle des Wirtschaftsverkehrs D, 2013 Seiten 261	EB <input type="checkbox"/> WV <input checked="" type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input type="checkbox"/> IVA <input type="checkbox"/> ÖVA <input type="checkbox"/> UR <input type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input type="checkbox"/> VM <input type="checkbox"/> MS <input type="checkbox"/>	ERZ - ZW - MW - VS - RZ - Konv - Test -
Veröffentlichung Qualitätssicherung von Verkehrsnachfrage modellen  D, 2016 Seiten 13	EB <input type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input checked="" type="checkbox"/> Prog <input type="checkbox"/> Doku <input type="checkbox"/>	ZE <input type="checkbox"/> IVA <input type="checkbox"/> ÖVA <input type="checkbox"/> UR <input type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input type="checkbox"/> VM <input type="checkbox"/> MS <input type="checkbox"/>	ERZ K ZW K MW K VS K RZ K Konv K Test S, R
Forschungsprojekt Qualitätssicherung von Verkehrsmodellber- rechnungen  CH, 2018 Seiten 269	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input checked="" type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ K, W ZW K, W MW K, W VS K, W RZ K, W Konv K, W Test S, R
Leitfaden National guidelines for transport system management in Australia  Australien, 2006 Seiten 140	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input checked="" type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input checked="" type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ - ZW - MW - VS K, W RZ K, W Konv K, W Test S, R

Quelle Jahr Umfang	Einsatzbereich Wirtschaftsverkehr HH-Befragung Prognose Dokumentation	Vorgaben Netzmodell	Vorgaben Modellstruktur	Qualitätskenngrößen
Leitfaden Jaspers Appraisal Guidance (Transport)  EU, 2007 Seiten 57	EB <input type="checkbox"/> WV <input checked="" type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input checked="" type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input type="checkbox"/> MS <input type="checkbox"/>	ERZ - ZW K MW K VS K RZ - Konv - Test S, R
FSV-Merkblatt (Entwurf) QUALIVERMO  A, 2012 Seiten 113	EB <input type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input type="checkbox"/> VM <input type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ K ZW K MW K VS K, W RZ K Konv - Test S, R
Richtlinie WebTAG   UK, 2013 Seiten 300	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input checked="" type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input checked="" type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ - ZW - MW - VS K, W RZ K Konv K, W Test S, R
Leitfaden Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual  USA, 2014 Seiten 240	EB <input type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input type="checkbox"/> IVA <input type="checkbox"/> ÖVA <input type="checkbox"/> UR <input type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input type="checkbox"/> VM <input type="checkbox"/> MS <input type="checkbox"/>	ERZ K ZW K, W MW K, W VS K, W RZ K, W Konv K, W Test S, R
FGSV- Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfrage modellen (Entwurf)  D, 20xx Seiten -	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input checked="" type="checkbox"/> HHB <input checked="" type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input checked="" type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ K, W ZW K, W MW K, W VS K, W RZ K, W Konv K, W Test S, R
FGSV- Empfehlungen zur Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfrage modellen zu Berechnung des Wirtschaftsverkehrs (Entwurf) D, 2020 Seiten -	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input checked="" type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input checked="" type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ - ZW - MW - VS - RZ - Konv - Test -

Tabelle 3-2: Überblick über wesentliche Aussagen der Veröffentlichungen zum Aufbau und zur Qualität von Verkehrsnachfragemodellen.

## **3.2 Forschungsprojekte**

Die im Folgenden ausgewerteten Forschungsprojekte sind nach dem Jahr der Veröffentlichung sortiert.

### **3.2.1 Forschungsprojekt Analyse der Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen (D, 2001)**

Köhler et al. [81] stellen im Heft 804 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des bundesdeutschen Verkehrsministeriums [81] den Entwicklungsstand von Verkehrsnachfragemodellen des Personenverkehrs im Jahr 2001 dar. Zu Beginn werden dazu die Historie und die Theorie dieser Modelle näher betrachtet, inklusive einer Typisierung der unterschiedlichen Modelltypen und Berechnungsverfahren. Anschließend werden Anforderungsprofile für Verkehrsnachfragemodelle definiert. Die Anforderungsprofile sind dabei abhängig von:

- den objektiven und subjektiven Einflussfaktoren auf das Mobilitätsverhalten,
- den zu untersuchenden Maßnahmen bzw. deren Kategorien (eine Übersicht über mögliche Maßnahmen und deren Auswirkungen auf die Modellstruktur findet sich in Tabelle 3-3),
- der Abbildung des induzierten Verkehrs,
- der Abbildung des Güterverkehrs und
- den verfügbaren (erhobenen / zu erhebenden) Verkehrsnachfragedaten.

Maßnahme	Beispiel	Strukturdaten	Verhaltensparameter	Anziehungsgewichte	Widerstandsfunktionen	Widerstand
siedlungsstrukturell	Änderung in der Nutzung der Siedlungsstruktur	✓		✓		
infrastrukturell	Bauliche Änderungen in den Verkehrsnetzen			(✓)		✓
ordnungspolitisch	Restriktionen für den fließenden und ruhenden MIV <sup>3</sup>					✓
	Änderungen in der Zulassung zum Führen von Kfz		✓			
kostenbeeinflussend	Änderungen in den Fahrzeugfixkosten (Steuern, Gebühren)		✓			
	Änderungen in den laufenden Fahrzeugkosten (Road-Pricing)		(✓)		(✓)	✓
organisatorisch	Erhöhung der Kfz-Auslastungsgrade		✓			✓
	Areale Sperrungen, City-Logistik					✓
betrieblich	Verkehrsnetz-, linienbezogene Fahrtzeitänderungen					✓
	Vertaktung im ÖV		(✓)			✓
verkehrstechnisch	Grüne Welle					✓
	LSA-Beeinflussung im ÖPNV <sup>4</sup>					✓
fahrzeugtechnisch	Änderung der Reisegeschwindigkeit (Komfort)		(✓)		(✓)	✓
informationsverbessernd	Fahrgastinformationssysteme					✓
	Dynamische Leitsysteme im MIV		✓			✓
bewusstseinsbildend	Werbung, Öffentlichkeitsarbeit		✓			

Tabelle 3-3: Wirkungen verkehrsplanerischer Handlungsansätze auf die Modellstruktur (nach [81]).

Als spezielle Anforderungen hinsichtlich der Abbildung des Güterverkehrs werden der Einbezug von Reisekosten als Widerstandskriterium und eine Möglichkeit zur Berücksichtigung neuer güterverkehrsplanerischer Maßnahmen sowie generell verschiedener Transportweisen genannt. Letztere Anforderung liegt in der Abbildung des Transportes unterschiedlicher Güterarten begründet und beinhaltet die Abbildung von Touren. Besondere Beachtung sollte zudem der Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr bekommen, welcher durch eine Abbildung des Güterverkehrs an Bedeutung gewinnt.

Zudem werden folgende allgemeine Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle gestellt:

- Maßnahmensensitivität,
- logische Konsistenz,
- räumliche und zeitliche Übertragbarkeit,
- Reproduzierbarkeit und Transparenz,
- Operationalität und
- Prognostizierbarkeit.

Die definierten Anforderungen werden im Nachgang an einer Auswahl von bekannten Modellen des Nah-, Regional- und Fernverkehrs überprüft, insbesondere der Modellaufbau und die

<sup>3</sup> MIV: motorisierter Individualverkehr

<sup>4</sup> ÖPNV: Öffentlicher Personennahverkehr

Modelleingangsdaten. Es findet eine kritische Betrachtung der Modelle bezüglich der mathematischen Konsistenz und der Eignung für bestimmte Einsatzzwecke statt. Darauf aufbauend werden die festgestellten Mängel analysiert und dargestellt. Es wird hierbei in allgemeine modelltheoretische Mängel der einzelnen Teilmodelle und Mängel hinsichtlich der Modellanwendung unterschieden.

### 3.2.2 Forschungsprojekt QUALIMOD (D, 2008)

Herkt et al. [73] verfolgten mit dem Projekt QUALIMOD (Qualitätsanforderungen und -standards für Verkehrsmodellrechnungen) das Ziel, anwendungsbezogene Qualitätsmerkmale zu definieren, um die Vergleichbarkeit von makroskopischen Verkehrsmodellen zu erhöhen. Aufbauend auf Scholles [112] und Steyer [123] wurden folgende Qualitätsmerkmale herausgearbeitet:

- Vollständigkeit / Differenzierung,
- Genauigkeit,
- Zuverlässigkeit,
- Vergleichbarkeit,
- Verständlichkeit sowie
- Aktualität und Raumbezug.

Diese Qualitätsmerkmale können zudem in vier Kategorien gruppiert werden:

- Kategorie 1: quantitativ beschreibbare Qualitätsgrößen mit praktisch nutzbaren Orientierungswerten,
- Kategorie 2: Qualitätsgrößen, die in Abhängigkeit der Modellanwendung quantitativ bestimmt werden können,
- Kategorie 3: qualitative beschreibende Merkmale und
- Kategorie 4: Qualitätsgrößen der Eingangsdaten.

In Kombination mit den klassischen vier Modellstufen schlagen die Autoren eine modulartige Qualitätsspezifikation vor (siehe Tabelle 3-4).

Qualitätsmerkmal	Erzeugung	Verteilung	Aufteilung	Umlegung
Vollständigkeit / Differenzierung	Kat. 3		Kat. 3	
Genauigkeit (der Abbildung des Analysefalls)	Kat. 1 und Kat. 2	Kat. 2	Kat. 2	Kat. 1
Zuverlässigkeit (Abbildung von Maßnahmen / Prognosen)	Kat. 3		Kat. 3	
Vergleichbarkeit	Kat. 4			
Verständlichkeit	Kat. 3			
Aktualität und Raumbezug	Kat. 4			

Tabelle 3-4: Modulartige Qualitätsspezifikationen (eigene Darstellung nach [73]).

Nachfolgend werden Einflüsse auf die Abbildungsgenauigkeit hauptsächlich hinsichtlich der Eingangsdaten betrachtet. Eine Auswertung der Abbildungsgenauigkeit erfolgte anhand von acht Modellberichten und mittels der Prüfung von zwei vorliegenden Modellen. Zusammenfassend werden einerseits Hinweise für die Kalibrierung des Verkehrsnachfragemodells und des Verkehrsnetzmodells

gegeben und darüber hinaus noch allgemeine Hinweise für die Qualitätssicherung von Verkehrsmodellrechnungen, im Wesentlichen:

- verlässliche und differenzierte Eingangsdaten,
- unabhängige Kalibrierung und
- umfassende und transparente Dokumentation.

### **3.2.3 Forschungsprojekt Datenanforderungen an die Weiterentwicklung kleinräumiger Verkehrsnachfragemodelle des Wirtschaftsverkehrs (D, 2013)**

Das Forschungsvorhaben FE-Nr. 70.0851/10 „Datenanforderungen an die Weiterentwicklung kleinräumiger Verkehrsnachfragemodelle des Wirtschaftsverkehrs“ [83] wurde im Auftrag des damaligen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) durch die Bergische Universität Wuppertal, vertreten durch Prof. Bert Leerkamp, und die IVV GmbH Aachen bearbeitet.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die „Potenziale neuer und bestehender Datenquellen im Hinblick auf die kleinräumige Wirtschaftsverkehrsmodellierung zu untersuchen“ und Empfehlungen hinsichtlich der Verbesserung dieser Daten abzuleiten.

Ein übergeordnetes Interesse liegt in der Schaffung einer Grundlage für Verbesserungsansätze für Verfahren zur Modellierung der Verkehrserzeugung von Betriebsstätten und Verfahren der Zielwahlmodellierung. Zum einen soll bei der Verkehrserzeugung eine verstärkt zielverkehrsbezogene Betrachtungsweise des Wirtschaftsverkehrs ermöglicht, zum anderen bei der Zielwahlmodellierung eine größere Differenzierung nach Wirtschaftszweigen hinsichtlich der Auswahl und Gewichtung von Zielattraktionspotentialen sowie hinsichtlich der zu überwindenden Widerstände erreicht werden. [83]

Im Zuge des Vorhabens wurde bereits ein Leitfaden für die Praxis [82] veröffentlicht, in welchem abgeleitete Anforderungen an die Modellbildung praxisbezogen dargestellt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei, den Zielen des Vorhabens entsprechend, auf den Datenanforderungen.

Bei den Datenanforderungen wird für kleinräumige Wirtschaftsverkehrsmodelle zwischen Modelleingangsdaten und Daten zur Modellvalidierung unterschieden. Letztere setzen sich aus Verkehrszustandsdaten zusammen und dürfen nicht gleichzeitig als Eingangsdaten verwendet werden [82]. Erstere hingegen werden weiter nach Siedlungsstrukturdaten sowie Daten zum Verkehrsnachfrageverhalten unterschieden.

Als zu verwendende Siedlungsstrukturdaten werden dabei

- personenbezogene Daten (Beschäftigung),
- betriebsbezogene Daten (z.B. Wirtschaftszweig),
- Flächennutzungsdaten,
- Fahrzeugbestand,
- sowie Netzdaten (z.B. Tonnagebeschränkungen)

gefordert. Generell sollten laut Forschungsvorhaben Siedlungsstrukturdaten mit ausreichend sachlicher Differenzierung verwendet werden und möglichst exakt mit der Wirklichkeit übereinstimmen. Als

besonderes Problem ist die feinteilige räumliche Zuordnung von Beschäftigtendaten aufgeführt, welche gleichzeitig, differenziert nach Art der wirtschaftlichen Tätigkeit, als „essentiell für die Modellgüte“ beschrieben wird [82]. Zur Abhilfe wird die Verwendung von Flächennutzungsdaten und entsprechenden Beschäftigtendichten vorgeschlagen. Für Prognosen müssen die Siedlungsstrukturdaten zudem auf Grundlage von Szenario-Untersuchungen geschätzt werden können.

Die Verkehrsverhaltensdaten sollen sich aus fahrzeugbezogenen und betriebsbezogenen Daten zusammensetzen. Als Beispiele für Verhaltensdaten werden z.B. Einsatzzeiten oder Anzahl der Stopps entlang einer Fahrtenkette aufgeführt. Das Fahrzeug wird dabei als Akteur betrachtet. Verhaltensdaten sind zur Kalibrierung heranzuziehen. Es wird angemerkt, dass für kleinräumige Wirtschaftsverkehrsmodelle keine Verkehrsmittelwahlschätzungen notwendig sind. [82]

Bei den Verkehrszustandsdaten zur Validierung des Modells werden für kleinräumige Verkehrsnachfragemodelle Verkehrsmengendaten empfohlen.

Die notwendige Qualität der geforderten Daten spezifiziert das Forschungsvorhaben anhand einer Einteilung von Arten von Unsicherheiten nach Scholles [112] nochmal genauer. Dabei wird generell für die Modelleingangsdaten postuliert, dass diese vor allem als potentielle Modellparameterfehler, z.B. durch Mess- oder Schätzfehler, eine Bedeutung für die „Unsicherheit“ des Modells besitzen. Siedlungsstrukturdaten sollten hier „geringe bis keine Parameterfehler erzeugen“. Bei Verhaltensdaten hingegen ist durch ihre häufige Ermittlung aus Stichprobenerhebungen mit „größeren Parameterfehlern“ zu rechnen. Im Gegensatz dazu ist eine natürliche Varianz der Daten durch Schwankungen in der Realität hinzunehmen.

Für eine darüberhinausgehende Bewertung der benötigten Qualität wird auf die Abhängigkeit vom Einsatzzweck des Modells verwiesen. In diesem Zusammenhang wird auch von einer Optimierungsaufgabe gesprochen. Ein Lösungsvorschlag ist die Verwendung der Qualitätskriterien für Modelldaten und Verkehrsmodellrechnungen nach Herkt et al. [73]. Die Qualitätskriterien bestehen dabei aus:

- Vollständigkeit,
- Genauigkeit,
- Zuverlässigkeit,
- Aktualität und
- Verständlichkeit (Transparenz).

Unter Vollständigkeit wird die Fähigkeit des Modells zur vollständigen Abbildung der Realität verstanden. Unterschieden wird dabei zwischen inhaltlichen, räumlichen und zeitlichen Aspekten. Das Qualitätskriterium Genauigkeit bezieht sich auf die Exaktheit, mit der Verkehrszustandsdaten im Modell beschrieben werden können. Die Zuverlässigkeit beschreibt die Kontrolle von „unvermeidbaren Abweichungen vom realen Verkehrsgeschehen“. Die Kriterien Aktualität und Verständlichkeit beziehen sich auf die Modelleingangsdaten und Rechenergebnisse des Modells. Verwendete Datensätze sollten beispielsweise mit vollständigen Metadaten versehen sein.

In seinem Praxisleitfaden [82] liefert das Forschungsvorhaben auf Basis dieser Qualitätskriterien bereits eine konkrete Auswahl an bewerteten Datenquellen für die Modellbildung. Dabei handelt es sich insbesondere um wirtschaftsverkehrsspezifische Daten, wie z.B. Beschäftigtenzahlen oder betriebsbezogene Verhaltensdaten. Es werden drei Bewertungsstufen verwendet und die getroffenen Einschätzungen durch kurze Anmerkungen ergänzt.

Anhand des erstellten Bewertungskatalogs kann der Modellersteller überprüfen, inwieweit seine verwendeten Daten den Qualitätskriterien entsprechen.

Ferner kann anhand der Kriterien eine eigenständige Einschätzung von neuen bzw. nicht genannten Datenquellen vorgenommen werden.

### **3.2.4 Veröffentlichung Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen (D, 2016)**

Im Rahmen eines Projekts der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wird zu den „Einflussgrößen auf die Qualität von makroskopischen Nachfragemodellen im Personenverkehr“ [68] geforscht. Im Zuge dieses Forschungsprojektes entstand der Beitrag von Pestel et al. zur „Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen“ [97].

Im Beitrag wird eine Vorgehensweise für den Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells vorgestellt. Dazu werden Gütemaße für die Überprüfung von Einzelwerten, Mengen von Einzelwerten und Verteilungen im Rahmen der Qualitätssicherung dargestellt und bewertet. Der eigentliche Qualitätssicherungsprozess beginnt mit der Aufstellung und Prüfung einer Modellspezifikation. Dann soll eine Prüfung von Modelleingangsdaten erfolgen, für die beispielhaft Überprüfungsmöglichkeiten benannt werden. Im Mittelpunkt des Qualitätssicherungsprozesses steht der iterative Prozess der Kalibrierung und Validierung. Für die Validierung werden im Beitrag Kenngrößen vorgeschlagen. Zur Überprüfung des Modellverhaltens werden mit Bezug auf amerikanische und britische Richtlinien Sensitivitätstests und Realitätstests empfohlen.

### **3.2.5 Forschungsprojekt Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen (CH, 2018)**

Das Forschungsprojekt „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen“ [107], das durch die Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI) beauftragt wurde, formuliert Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle hinsichtlich der Modellerstellung und der Qualitätssicherung.

Nach einer einleitenden Übersicht über Arten und Methoden der Nachfragemodellierung sowie der Beschreibung des derzeitigen Standes der Qualitätssicherung in Forschung und Praxis werden konkrete Anforderungen formuliert. Diese betreffen die Teilgebiete:

- Einsatzbereiche des Modells,
- Abbildung der Entscheidungsprozesse (Modellstufen),
- Wahl des Planungs- und Untersuchungsraumes,

- Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur,
- Abbildung des Verkehrsangebots,
- Abbildung der Verkehrsnachfrage,
- Abbildung von Eventverkehr, Wirtschaftsverkehr und externem Verkehr,
- Prognose und
- Datenquellen.

Die Anforderungen haben hierbei einen empfehlenden Charakter, wobei sich diese zum Teil folgendermaßen differenzieren lassen:

- allgemeine Hinweise,
- Hinweise bezüglich der Modellparameter,
- allgemeine Empfehlungen und
- optionale Empfehlungen.

Bei manchen Teilgebieten werden die Anforderungen zusätzlich modelltypenspezifisch (städtische / regionale Modelle oder großräumige / nationale Modelle) formuliert.

Für die Überprüfung der Modellqualität werden Empfehlungen für die Bewertung von Einzelwerten, Mengen von Einzelwerten und Verteilungen erläutert und zum Teil neu entwickelt. Es wird darüber hinaus ein Qualitätssicherungsprozess beschrieben, der parallel zur Modellerstellung stattfinden soll. Es folgen Anforderungen, wie der Modellerstellungs- und Qualitätssicherungsprozess zu dokumentieren ist.

Abschließend erfolgt die Erprobung der vorgestellten Qualitätsprüfungen und -analysen anhand von drei Modellen (Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich, Verkehrsnachfragemodell der Region Stuttgart, Verkehrsmodell des Kantons Neuchâtel). Konkret werden die Modelleingangsdaten (Erhebungsdaten, Siedlungsstrukturdaten, Verkehrsangebotsdaten, Verbindungskenngrößen), die Modellparameter und die Modellergebnisse überprüft. Bei der Überprüfung der Modellergebnisse werden die Mobilitätsraten und das Verkehrsaufkommen, die Reiseweiten und die Verkehrsleistung, der Reisezeitaufwand und der Verkehrszeitaufwand, die Verkehrsstärken sowie das Modellverhalten validiert.

Für die Überprüfung des Modellverhaltens werden Sensitivitätstests (Modifizierung eines einzelnen Modellparameters) und Realitätstests (Modifizierung einer einzelnen Modellvariable) verwendet. Für die jeweiligen Tests werden Erwartungen hinsichtlich der Änderungen von Modellkenngrößen und Elastizitäten beschrieben (siehe Anlage 2.2.2).

### 3.3 Richtlinien und Leitfäden

Die im Folgenden ausgewerteten Richtlinien und Leitfäden sind nach dem Jahr der Veröffentlichung sortiert.

#### 3.3.1 National guidelines for transport system management in Australia (AUS, 2006)

Der „Australian Transport Council“ hat 2006 den „National Guideline for Transport System Management in Australia“ veröffentlicht [2]. Das Kapitel 4, Teil 2 dieses Leitfadens beschäftigt sich mit der Entwicklung und der Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen. Der Leitfaden soll dabei keine detaillierte Beschreibung von Anforderungen an ein Verkehrsnachfragemodell sein, sondern ein pragmatisches Hilfsmittel zum Aufbau und der Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen.

Der Leitfaden definiert zunächst grundsätzliche allgemeine Anforderungen an ein Verkehrsnachfragemodell:

- Durchführung von quantitativen Bewertungen von verkehrlichen Maßnahmen,
- Verkehrliche Bestätigung von großen Infrastrukturmaßnahmen,
- Abbildung des Wirkungsgebiets der Maßnahmen und
- Abbildung der Wirkung der Maßnahmen auf die Flächennutzung.

Weitere Anforderungen beziehen sich auf die Verbindung von Verkehrsnachfragemodellen mit der Modellierung der Flächennutzung, der Modellierung von Szenarien und Maßnahmen und von Detailuntersuchungen des Verkehrsablaufs mit Methoden der operativen Modellierung und der Mikrosimulation.

In den folgenden Kapiteln

- wird der 4-Stufen-Ansatz mit den Schritten Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Moduswahl und Umliegung in einer allgemeinen Form beschrieben. Besondere Anforderungen werden hierbei nicht genannt.
- werden Anforderungen und Vorschläge zu den Themen, Verkehrszellen, Netzmodell Straße und ÖV, Nachfrageerhebung, Modellkonvergenz, Spitzenstundenmodellierung, Einsatz von Matrixkorrekturverfahren, Modellkalibrierung und Dokumentation beschrieben. Die genannten Anforderungen enthalten auch hier keine Besonderheiten.

Der Leitfaden enthält auch Vorschläge zur Überprüfung

- der Netzmodellierung und
- der Konvergenz der Umliegung.

Ausführlich wird auf die Validierung der Umliegungsergebnisse eingegangen. Der Leitfaden unterscheidet zwischen statischer Validierung und dynamischer Validierung. Die statische Validierung umfasst den Vergleich der Modellergebnisse mit Zählwerten. Dazu werden die üblichen Abweichungsmaße wie relative Abweichung,  $GEH$ ,  $RMSE$ ,  $R^2$  vorgestellt (siehe Kapitel 8). Als Zielwerte (Stundenwerte) werden  $\pm 20\%$  für Strecken (bzw.  $\pm 15\%$  für Strecken mit mehr als 15.000 Fzg / Tag)

und 10 % für Screenlines angegeben. Es wird auch die Analyse der modellierten Reisezeiten gefordert, wobei hierfür keine Zielwerte angegeben sind.

Die dynamische Validierung umfasst Realitäts- und Sensitivitätstests. Es werden folgende Tests vorgeschlagen:

- Modifizierung CR-Funktionen und Prüfung, ob die Reaktion der Umlegung logisch ist,
- Nachfrageelastizität bei Veränderung ÖV-Preise um  $\pm 10\%$ ,
- Nachfrageelastizität bei Veränderung Value of Time,
- Nachfrageelastizität bei Veränderung ÖV-Angebot und
- Nachfrageelastizität bei Veränderung Verkehrserzeugung.

### **3.3.2 Leitfaden Jaspers Appraisal Guidance (Transport) (EU, 2007)**

Der Leitfaden Jaspers<sup>5</sup> Appraisal Guidance [79] kann als vorbereitendes Hinweispapier auf dem Weg zu einer EU-Richtlinie zur Erstellung von Verkehrsmodellen angesehen werden. Existieren keine nationalen Richtlinien zur Modellierung sollten diese Hinweise angewandt werden. Ein Teil der Richtlinie richtet sich an die ausschreibende Verwaltungsbehörde und dient der Vermittlung eines grundlegenden Verständnisses der inhaltlichen aber auch organisatorischen Anforderungen während der Ausschreibungsphase. Enthalten ist beispielsweise eine Checkliste zum Management des Modellierungsprojektes, die u.a. die Benennung von Einsatzzweck und Ziel des Modells, die Abklärung von Zugriffsrechten auf Eingangsdaten, Aussagen zur Dauer der Modellwartung und ein Modellhandbuch fordert.

Der zweite Teil der Richtlinie richtet sich an Modellexperten bzw. Modellentwickler. Für beide Zielgruppen soll durch die Richtlinie vor allem das Beurteilungsvermögen zu Fortschritt und Qualität des Modellierungsvorhabens geschärft werden. Zunächst wird ein Überblick über vorhandene Modellierungsmethoden gegeben. Dann folgen Kapitel mit Hinweisen bzw. Anforderungen hinsichtlich

- Ausdehnung des Modellraums,
- Netzdichte,
- Verkehrszellenbildung,
- Fahrzeugklassen und Modi,
- Segmentierung der Nachfrage hinsichtlich Aktivitäten und Personengruppen,
- Güterverkehr,
- Bezugszeitraum und Prognosezeitpunkt,
- Datenverfügbarkeit,
- Verhaltensparameter und zu verwendende mathematische Funktionen und
- Dokumentation.

---

<sup>5</sup> JASPERS: Joint Assistance in Supporting Projects in European Regions

Die Hinweise bzw. formulierten Anforderungen sind dabei allgemeiner Natur und werden nicht nach konkreten Anwendungsfällen unterschieden.

Der Leitfaden Jaspers Appraisal Guidance enthält sowohl Hinweise zum organisatorischen als auch zum inhaltlichen Qualitätssicherungsprozess. In Teil 1 wird beispielsweise auf die Notwendigkeit eines unabhängigen technischen Reviews und einer ausführlichen Dokumentation hingewiesen. In Teil 2 erfolgt die Gesamtbeurteilung des Modells und damit auch seine inhaltliche Qualitätssicherung, im Wesentlichen anhand des Umlegungsergebnisses. Als mögliche Gründe für ein unbefriedigendes Umlegungsergebnis werden Fehler in der Wegematrix, Fehler im Netzmodell und unkorrekte Routenwahlparameter angegeben. Um diese aufzuzeigen, werden folgende Validierungskenngrößen genannt:

- mittlere Reiseweiten und Reiseweitenverteilung zur Validierung des Zielwahlmodells,
- absolute Gesamtnachfrage je Modus,
- Verkehrsstärken auf Straßenabschnitten und bzw. Streckenabschnitten des ÖV,
- Personen-, Fahrzeug- und Güterströme entlang von Screenlines oder Kordons,
- Ein- und Aussteiger im ÖV an wichtigen Bahnhöfen,
- Fahrtzeiten auf kritischen Routen und
- gewählte Routen im Netz.

Um die Qualität des Umlegungsergebnisses zu beschreiben, sollten Verkehrsstärken von Strecken oder Screenlines und Fahrtzeiten mit erhobenen Werten verglichen werden. Als Qualitätsmaß wird der *GEH*-Wert (siehe Kapitel 8.4.1) vorgeschlagen und konkrete Grenzwerte angegeben. Es wird außerdem empfohlen, die Fahrtmuster, Routenwahl, Reaktionen des Modells auf Änderungen im Netz und die Modellsensitivität zu überprüfen.

Darüber hinaus wird vorgeschlagen, Realitätstests durchzuführen. Dabei soll ein entsprechendes Szenario modelliert werden, für das anhand von historischen Daten bzw. Ergebnisse aus vergleichbaren Studien die Modellreaktionen geprüft werden können.

Die vorgenommenen Auswertungen und Ergebnisse sollen dokumentiert werden und für alle erhobenen Eingangsdaten sind Genauigkeiten (z.B. entsprechende Konfidenzintervalle) zu quantifizieren und anzugeben.

### **3.3.3 FSV-Merkblatt (Entwurf) QUALIVERMO (A, 2012)**

Der Bericht des Forschungsprojektes QUALIVERMO (Qualitätssicherung für die Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen und Verkehrsprognosen) [109] beschreibt ein umfangreiches Konzept des Qualitätsmanagements und der Qualitätsprüfung von Verkehrsmodellen. Auf Basis dieses Forschungsprojekt wird derzeit (seit 2012) am Entwurf eines Merkblattes gearbeitet. Ziel des Qualitätsmanagements und der Qualitätsprüfung von Verkehrsmodellen ist es, die bestmögliche Genauigkeit nach dem Stand der Forschung zu gewährleisten und durch eine größtmögliche Transparenz nicht nachvollziehbare Berechnungen, sogenannte „Black-Box-Anwendungen“, zu

vermeiden. Allgemein soll das Bewusstsein hinsichtlich der Notwendigkeit von Qualitätsmanagements- und Qualitätsprüfungskonzepten gesteigert werden.

Die Qualitätssicherung beginnt mit dem Dokumentieren der Parteien, die am Entwicklungsprozess beteiligt sind, den Zielen der Modellanwendungen (z.B. abbildbare Maßnahmen und Aggregationsgrad der Ergebnisse, Berücksichtigung von externen Entwicklungen) und den Rahmenbedingungen der Entwicklung (z.B. verwendete Software, Modellverfügbarkeit / -übergabe). Ebenfalls wichtig ist die Definition der räumlichen Segmentierung (z.B. Planungs- und Untersuchungsraum, Zelleneinteilung), der inhaltlichen Segmentierung (z.B. welche Nachfragegruppen, Personen- und / oder Güterverkehr, welche Modi / Verkehrsmittel) und der zeitlichen Segmentierung (z.B. modellierter Zeitraum, Bezugszeitraum, Analyse- und Prognosezeitpunkt) vor Beginn der Modellerstellung. Die geforderten Zielwerte der Erhebungs- und Modellqualität müssen ebenfalls im Vorfeld definiert werden.

Es folgen Prozesse zur Qualitätsprüfung

- der Modelleingabedaten (Verhaltensdaten, Angebotsmodell, Sozio- und Siedlungsstruktur, Erhebungs- bzw. Zähl Daten),
- der Qualität der jeweiligen Modellstufen (Verkehrserzeugung, Zielwahl, Moduswahl, Routenwahl, ggf. Tageszeitwahl),
- der Wirkungsmechanismen (mittels Sensitivitäts- und Realitätstests vgl. Kapitel 8.7.4) und
- der Modellplausibilität (mittels Testplanfällen, Backcasting, Verkehrsspinnen, visuellen Analysen).

Im Sinne der Transparenz sollen die verwendeten Modellmechanismen, sämtliche Eingangsdaten, Modellvariablen, Modellparameter und Modellergebnisse sowie die Ergebnisse der Qualitätsprüfung dokumentiert und offengelegt werden. Damit soll das Ziel erreicht werden, dass die Unsicherheiten des Modells transparent kommuniziert werden.

Zur eigentlichen Bewertung der Modelle werden folgende Indikatoren vorgestellt:

- Wurzel der mittleren Abweichungsquadrate  $AWA$  und  $PWA$  (siehe Kapitel 8.4.2),
- Konfidenzintervalle  $AKI$  und  $RKI$  (siehe Anlage 1.6),
- Erklärungsqualitätsindikator  $EQI$  (siehe Anlage 1.5),
- Koinzidenz-Verhältnis (siehe Kapitel 8.4.3),
- $GEH$ -Indikator (siehe Kapitel 8.4.1) und
- Elastizitäten (siehe Kapitel 8.7.4).

Abschließend wird ein Qualitätsmanagements- und Qualitätsprüfungsprozess erläutert, der durch paralleles und externes „Peer Reviewing“ die Qualität erhöhen soll. Für Anwender der „Richtlinie“ werden im Anhang Formblätter für die Qualitätsbeurteilung von Verkehrsmodellen bereitgestellt.

### 3.3.4 Richtlinie WebTAG (UK, 2014)

WebTAG<sup>6</sup> ist eine Richtlinie des britischen Verkehrsministeriums für die Planung und Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen im Bereich Straße und Schiene, von Angebotsänderungen im öffentlichen Verkehr und von Maßnahmen im Bereich des Verkehrsmanagements. Die Anwendung der Richtlinie ist eine Voraussetzung für die Anerkennung von Verkehrsuntersuchungen durch das britische Verkehrsministerium. Für Verkehrsuntersuchungen, die der Anerkennung durch das Ministerium nicht bedürfen, dient die Richtlinie als maßgeblicher Leitfaden (Best Practice Guide).

Bezüglich der Verkehrsnachfragemodellierung ist die Richtlinie in folgende Teile (Units) gegliedert.

- Unit 1 [31]: Prinzipien der Modellierung und Prognose
- Unit 1.2 [32]: Datengrundlagen und Erhebungen
- Unit 2 [37]: Nachfragemodellierung
- Unit 3.1 [33]: Umlegung Straßenverkehr
- Unit 3.2 [34]: Umlegung Öffentlicher Verkehr
- Unit 4 [38]: Prognose und Unsicherheiten
- Unit 5.1 [35]: Abbildung von ruhendem Verkehr und Park+Ride
- Unit 5.2 [36]: Abbildung von Entscheidungsverhalten

In diesen Units werden technische Anforderungen an die Modellierung und Qualitätsziele spezifiziert.

WebTAG beinhaltet umfangreiche methodische Anforderungen an die Verkehrsnachfragemodellierung. Dies umfasst:

- die Notwendigkeit des Einsatzes eines Verkehrsnachfragemodells mit variabler oder fixer Nachfrage,
- die Notwendigkeit zum Aufbau eines multimodalen Modells,
- die Definition des Modellgebiets und der Verkehrszellen,
- die Beschreibung möglicher Modellformen (absolute Modelle bzw. inkrementelle Modelle),
- die Erstellung von Matrizen auf Basis von Nachfrageerhebungen,
- die Modellierung von Stundengruppen,
- die Segmentierung der Nachfragemodellierung nach Personen, Wegezwecken, Modi und Verkehrssystemen,
- die Modellschritte eines Nachfragemodells und deren Hierarchie, namentlich:
  - Verkehrserzeugung,
  - Moduswahl,
  - Abfahrtszeitwahl,

---

<sup>6</sup> WebTAG: Web-based Transport Analysis Guidance

- Verkehrsverteilung und
- Umlegung;
- mögliche Formen der Entscheidungsmodelle (Logit),
- die Spezifizierung der Kosten- bzw. Nutzenfunktionen und deren Implementierung in den Modellstufen Moduswahl, Verkehrsverteilung und Abfahrtszeitwahl,
- die Implementierung der Rückkopplung von Umlegung und Matrixberechnung und
- die Beschreibungen zur Durchführung der Modellkalibrierung (Parameterermittlung und übliche Parameterbereiche)

In WebTAG werden zudem Anforderungen an die Validierung des Modells für den Straßenverkehr [33] und für den öffentlichen Verkehr [34] definiert.

Zusätzlich fordert WebTAG, dass für ein Verkehrsnachfragemodell (variable demand model), das für die Bewertung von verkehrlichen Maßnahmen eingesetzt wird, die Einsatzfähigkeit bezüglich Konvergenz, Wirklichkeitsnähe und Sensitivität nachgewiesen werden muss.

### **Modell für den Straßenverkehr**

WebTAG [33] untergliedert die Überprüfung des Modells für den Straßenverkehr in die Bereiche:

- Netzmodell,
- Routenwahl,
- Nachfragematrix und
- Umlegung.

Um die Qualität des Netzmodells für die Straße zu bewerten, sollten folgende Überprüfungen durchgeführt werden:

- Prüfung von Netzstruktur und Netzzusammenhang,
- Sinnhaftigkeit der Strecken- und Knotentypisierung,
- Vergleich von Kapazitäten im Netz mit Zählwerten,
- Vergleich von berechneten und beobachteten Zeitverlusten auf Strecken und an Knoten und
- Prüfung der Routenwahl für Pkw und Lkw.

Die Prüfung der Routenwahl sollte für eine Auswahl von Verbindungen zwischen ausgewählten Quellen und Zielen zwischen Einwohner- und Arbeitsplatzschwerpunkten und wichtigen Kreuzungspunkten im Netz erfolgen. Kriterien für die Auswahl geeigneter Routen sind:

- Relevante Nachfrage,
- Routenlänge > 20 min,
- Route führt durch das Planungsgebiet einer wichtigen Maßnahme,

- Wahl von Routen in unterschiedlichen Bereichen des Netzes (z.B. von Nord nach Süd und von Ost nach West) und
- beide Richtungen einer Route.

Die Zahl der Routen pro Verkehrssystem, die überprüft werden sollen, liegt zwischen 3 (bei 100 Verkehrszellen) und 10 (bei 10.000 Verkehrszellen). Fahrtzeiten von ausgewählten Routen werden anhand absoluter und relativer Abweichungen bewertet (kleiner als 15 % bzw. 1 min, wenn Abweichung größer als 15 %). WebTAG geht in der Regel von der Anwendung eines inkrementellen Nachfragemodells aus. Daher unterscheidet WebTAG zwischen einer „Prior“ Matrix und einer „Calibrated“ Matrix. Die „Prior“ Matrix ist gemäß der WebTAG Modellphilosophie eine Kombination aus empirischen und synthetisch (modellbasiert) erzeugten Nachfragedaten. Die Überprüfung der Qualität der Nachfragematrix findet mit Hilfe von Screenlines (Schnittlinien im Netz, z.B. alle Brücken) statt. So sollen die Abweichungen zwischen Modell- und Zählwerten für alle Screenlines kleiner als 5 % sein. Falls diese Abweichungen überschritten werden, kann die Matrix mit Hilfe einer Matrixkorrektur verbessert werden. Dazu werden in den WebTAG Vorgaben gemacht.

Die Validierung der Umlegung Straße erfolgt anhand eines Vergleichs mit empirischen Verkehrsstärken auf Strecken, an wichtigen Knotenpunkten und auf Screenlines. Als Maß für die Abweichung werden die relative und absolute Abweichung sowie der *GEH*-Wert (siehe Kapitel 8.4.1) eingesetzt. Verkehrsstärken sind differenziert nach Verkehrssystem und für Stundenzeiträume zu validieren.

Beschreibung	Ziel
Verkehrsstärken < 700 Fzg / h : Abweichung < 100 Fzg	>85% aller Fälle
Verkehrsstärken zwischen 700 und 2.700 Fzg / h: Abweichung < 15 %	>85% aller Fälle
Verkehrsstärken > 2.700 Fzg / h : Abweichung < 400 Fzg / h	>85% aller Fälle
<i>GEH</i> < 5 für alle Verkehrsstärken	>85% aller Fälle

Tabelle 3-5: WebTAG - Validierungskriterien Umlegung Straße für stündliche Verkehrsstärken.

Die Konvergenz der Umlegung ist z.B. mit dem Relative Gap, dem Anteil der Strecken mit einer bestimmten Nachfrageänderung bzw. Widerstandsänderung oder der Änderung des Gesamtaufwands zwischen den letzten beiden Iterationsschritten nachzuweisen. Akzeptable Wertebereiche sind angegeben.

### Modell für den öffentlichen Verkehr

WebTAG untergliedert in [34] die Überprüfung des Modells für den öffentlichen Verkehr in die Bereiche:

- Netz- und Angebotsmodell,
- Nachfragematrix und
- Umlegung.

Die Validierung des Netz- und Angebotsmodells für den öffentlichen Verkehr soll neben der topologischen Kodierung, die Überprüfung der Fahrtzeiten, der Zugangszeiten und Zeiten für das Umsteigen beinhalten. Das Angebot soll durch Abgleich der Servicefahrten an Streckenzählwerten überprüft werden.

Die Nachfragematrix soll durch Vergleich mit Zählwerten an Screenlines und Kordons überprüft werden. Dabei sollen die Abweichungen für 95 % der Fälle kleiner als 15 % sein.

WebTAG schlägt vor, die Qualität der Umlegung durch Vergleiche mit empirischen Daten nachzuweisen:

- Ein- und Aussteiger an Haltestellen und
- Fahrgastzahlen an Screenlines, Kordons (für alle Verkehrssysteme, ggf. auch für Bus und Bahn getrennt)

Zielgrößen sind hier Abweichungen unter 15 %. Auf Strecken sind auch Abweichungen unter 25 % akzeptabel.

### Qualitätsanforderungen an ein Verkehrsnachfragemodell

Zusätzlich zu den Qualitätsanforderungen an die Verkehrsumlegung werden in WebTAG [37] Anforderungen an das Verkehrsnachfragemodell gestellt. Diese sind

- Konvergenz,
- Realitätstests und
- Sensitivitätstests.

Für den Konvergenznachweis bezüglich der Iteration zwischen Nachfrage und Umlegungsberechnung wird in WebTAG ein Konvergenzmaß eingeführt [37].

Für den Nachweis, dass das Modell realitätsnahe Ergebnisse bei der Erstellung von Prognosen erzeugen kann, wird die Berechnung der Preiselastizität vorgeschlagen:

$$\varepsilon = \frac{\ln\left(\frac{\text{Nachfrage}_{\text{nachher}}}{\text{Nachfrage}_{\text{vorher}}}\right)}{\ln\left(\frac{\text{Kosten}_{\text{nachher}}}{\text{Kosten}_{\text{vorher}}}\right)}$$

Als Zielgrößen für die Modellelastizität werden angegeben:

Variable	Eingabedaten	Eingabevariation	Bezugskenngröße	Zielbereich der Nachfrageelastizität
Kraftstoffpreis	Preis	+ 10% / 20%	Fahrzeugkilometer	- 0,25 ... - 0,35
ÖV-Tarif	Tarif	+ 10% / 20%	ÖV-Nachfrage	- 0,2 ... - 0,9
Pkw-Fahrtzeit	Fahrtzeit	z.B. $t^{\text{free}}$	Pkw-Nachfrage	< - 2,0

Tabelle 3-6: WebTAG - Realitätstests mit Zielbereichen für Nachfrageelastizität.

Sensitivitätstests sollen, im Gegensatz zu Elastizitätstests, den Einfluss von Modellparametern auf das Ergebnis aufzeigen. WebTAG schlägt dazu keine spezifischen Tests vor. Allerdings wird die Durchführung von solchen Tests für Parameter gefordert, die einen substantiellen Einfluss auf das Ergebnis haben und deren Wert nicht gesichert empirisch während der Kalibrierung ermittelt werden konnte.

Generell fordert WebTAG, dass sämtliche Kalibrierungs- und Validierungsschritte zu dokumentieren sind. Abweichungen, die in der Validierung festgestellt wurden und deren Einfluss auf das Modellergebnis müssen dargestellt und erläutert werden.

### **3.3.5 Leitfaden Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual (USA, 2014)**

Im Handbuch Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [26] werden Hinweise aus regionalen Richtlinien zusammengeführt. Das Handbuch Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [26] empfiehlt Tests auf den verschiedenen Modellstufen. Dabei wird häufig in aggregierte und disaggregierte Tests unterschieden. Meist werden darüber hinaus noch Hinweise zu Realitätstests und Prognosewerten gegeben.

- Inputdaten: Es wird z.B. ein Abgleich von Bevölkerungsdaten, Netzdaten und (berechneten) und Kenngrößen gefordert. Erhebungsmethoden sollten hinterfragt und die Daten aus verschiedenen Quellen plausibilisiert werden.
- Personengruppeneinteilung: Vergleiche haushaltsbezogener Daten mit statistischen Daten sind durchzuführen, z.B. Fahrzeugbesitz und -verfügbarkeit pro Haushalt.
- Verkehrserzeugung: Es sind Hinweise enthalten zu Binnenverkehr, externen Verkehren, Dienstleistungs- und Güterverkehr sowie für singuläre Verkehrserzeuger.
- Zielwahl: Bezüglich der Reiseweiten sollen für jeden Wegezweck die mittlere Reiseweite (maximal 5% Abweichung; Ausnahmen können niedrigfrequentierte Wegezwecke sein) analysiert werden. Die Richtigkeit der Reiseweitenverteilung und Reisezeitenverteilung ist durch eine graphische Gegenüberstellung oder die Verwendung des Coincidence Ratio (möglichst  $\geq 0,7$ ) nachzuweisen (siehe Kapitel 8.4.3). Ausnahmen können auch hier für niedrigfrequentierte Wegezwecke gelten. Darüber hinaus sollten Quelle-Ziel-Relationen geprüft werden, wobei einzelne Verkehrszellen auch zu größeren Einheiten aggregiert werden können. Eine Hilfe ist dabei der Orientation Ratio (siehe Anlage 1.7), dessen Ergebnis sowohl in Matrixform als auch graphisch dargestellt werden kann. Werte nahe 1 zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Erhebung und Modell. Ebenso wichtig ist die Analyse des Zellbinnenverkehrs, welcher modellseitig nicht mehr als 3 % von der Erhebung abweichen sollte.
- Moduswahl: Wege pro Modus und Zweck sind zu untersuchen. Darüber hinaus sind für den ÖV die Reiseweite bezüglich einer Relation und von Haltestelle zu Haltestelle und beim MIV Besetzungsgrade zu prüfen.
- Abfahrtszeitwahl: Hier sind Anteil Wege pro Zweck und Zeitintervall, Verkehrsstärke und -leistung pro Zeitintervall, ÖV-Wege pro Zeitintervall und Aktivitätendauern zu prüfen.
- Umlegung IV<sup>7</sup>: Die Validierung der Verkehrsumlegung betrachtet die Verkehrsleistung (in Fahrzeugkilometern), die Verkehrsstärke und Geschwindigkeitsdaten. Bezüglich der Verkehrsleistung ist auch eine regionale Aggregation möglich. Die Verkehrsstärkenanalyse bezieht sich auf

---

<sup>7</sup> IV: Individualverkehr

Strecken, Screenlines, Cutlines, Kordonpunkte und aggregierte Streckengruppen mittels  $\%RMSE$  und  $R^2$  (siehe Kapitel 8.4.2). Eine Darstellung der Modell- und Erhebungswerte in Punktwolken oder Differenzplots kann unterstützend wirken. Geschwindigkeitsvergleiche beziehen sich auf die modellierten Zeitintervalle oder Spitzenstunden. Sie vergleichen die aus dem Modell abgeleiteten Streckengeschwindigkeiten mit gemessenen Geschwindigkeiten. Zunächst sollten die modellierten und gemessenen Geschwindigkeiten als Punktwolken dargestellt werden, eventuell gruppiert nach Streckentyp oder Belastungsklasse. Diese Gruppierung folgt aus den Forderungen, dass stark belastete Strecken besser übereinstimmen sollten als Strecken mit niedriger Auslastung und dass sich die Geschwindigkeiten von schwach belasteten Strecken an den Geschwindigkeiten bei freiem Verkehrsfluss orientieren sollten. Darauf aufbauend können die Geschwindigkeiten für Modell und Erhebung über der Streckenauslastung abgetragen werden. Disaggregiert kann die Reisezeit für ausgewählte Routen oder Routenteile untersucht werden.

- Umlegung ÖV: Bezüglich der ÖV-Umlegung sollten die gesamten Zustiege sowie die Zustiege pro Linie und die Zustiege pro Verkehrsmittel evaluiert werden. Außerdem sollen die ÖV-Wege und die Zustiege in Beziehung gesetzt werden. Die Einsteiger- und Aussteigerzahlen einer Linie ergeben die Passagierzahlen, welche für Screenlines, Cutlines, Kordonpunkte und / oder Strecken verglichen werden können. Die modellierten Passagier-Km sollten pro Region, Linie, Verkehrsmittel, Zugangsmodus und / oder Abfahrtszeit verglichen werden. Wenn verfügbare Daten vorliegen, kann für ausgewählte Routen auch eine detaillierte Auswertung erfolgen.

### **3.3.6 FGSV-Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen (Entwurf) (D, 20xx)**

Der Arbeitskreis 1.2.6. „Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen des Personenverkehrs“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) arbeitet derzeit an den „Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen“ [42]. Nachdem einleitend auf unterschiedliche Verkehrsnachfragemodelltypen, deren Eigenschaften und die generelle Modellstruktur eingegangen wird, wird verdeutlicht, dass der Einsatzbereich bzw. der Anlass der Modellerstellung einen determinierenden Einfluss auf die Modellspezifikation haben. Aufbauend auf [81] werden die folgenden typischen Planungsaufgaben (und damit Modellkategorien) herausgearbeitet:

- strategische Planung für eine Gesamtstadt / Region (z.B. Kommunalen Verkehrsentwicklungsplan),
- Vorplanung für einen konkreten Standort (z.B. Standortuntersuchung),
- Vorplanung für einen Korridor (z.B. Variantenuntersuchung Ortsumfahrung),
- ÖV-Angebotskonzeption für eine Gesamtstadt / Region (Entwicklung ÖV-Konzept für einen Landkreis),
- Nutzen-Kosten-Untersuchung für einen Korridor (z.B. Linienverlängerung einer Stadtbahn mittels Standardisierter Bewertung),
- Umweltplanungen für eine Gesamtstadt / Region (z.B. Städtischer Lärminderungsplan bzw. Lärmaktionsplan nach VBUS [130] oder Luftreinhalteplanung nach HBEFA [18]),

- formales Planverfahren für einen konkreten Standort (z.B. Verkehrsuntersuchung zum Bebauungsplan),
- formales Planverfahren für eine Gesamtstadt / Region (z.B. Regionale strategische Straßennetzplanung),
- Bemessung / Entwurf für einen konkreten Standort (z.B. Knotenpunktuntersuchung) und
- Verkehrsmanagement für eine Gesamtstadt / Region (z.B. Strategieentwicklung für das Verkehrsmanagement einer Großstadt).

Für diese 10 typischen Planungsfälle werden konkrete Empfehlungen hinsichtlich der Modellkonzeption gegeben. Zusätzlich werden allgemeingültige Anforderungen hinsichtlich folgender Kriterien formuliert:

- Abbildung der Entscheidungsprozesse,
- Rückkopplungen,
- räumliche Abgrenzung,
- Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur,
- Abbildung des Verkehrsangebots,
- Abbildung der Verkehrsnachfrage,
- Abbildung von externem Verkehr und Wirtschaftsverkehr,
- Prognose und
- Datengrundlagen und -quellen.

Zusätzlich werden Empfehlungen hinsichtlich der Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen formuliert. Neben einigen allgemeinen Anforderungen, die sich an [73] orientieren, wird ein Prozess der Qualitätssicherung nach [97] bzw. [107] beschrieben. Stand Januar 2018 ist noch nicht absehbar, ob Gütegrenzen für konkrete Gütemaße empfohlen werden.

In den „Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen“ werden darüber hinaus noch Empfehlungen für eine korrekte Dokumentation sowie Empfehlungen für die Modellanwendung und Modellpflege gegeben.

### **3.3.7 FGSV-Empfehlungen zur Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen zur Berechnung des Wirtschaftsverkehrs (D, 2020)**

Ziel der FGSV „Empfehlungen zur Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen zur Berechnung des Wirtschaftsverkehrs“ [43] ist das Aufzeigen von Einsatzbereichen und den damit einhergehenden besonderen Anforderungen an Wirtschaftsverkehrsmodelle. Zudem wird ein Überblick über aktuelle Modellierungsansätze in der Praxis und konkrete Empfehlungen für den Einsatz der Modelle gegeben.

Als grundlegende Anforderungen an Verkehrsmodelle werden im Empfehlungspapier folgende Punkte genannt:

- Wirklichkeitstreue,
- Transparenz,
- Operabilität.

Unter Wirklichkeitstreue wird eine möglichst gute Übereinstimmung von Modelleingangsdaten und Modellergebnissen mit beobachteten bzw. erwarteten Werten verstanden. Zudem sollten die im Modell abgebildeten Zusammenhänge die Wirkungen von Entwicklungen und geplanten Maßnahmen in ausreichender Qualität abschätzen können.

Als transparent gilt laut Empfehlungspapier ein Verkehrsnachfragemodell, welches in seinem Verhalten und in seinen Ergebnissen von fachkundigen Dritten nachvollzogen werden kann. Dazu ist eine hinreichende Dokumentation des Modells inklusive einer Offenlegung von Eingangsdaten und Ergebnissen notwendig.

Unter dem Begriff Operabilität wird im Empfehlungspapier gefordert, dass ein validiertes Modell innerhalb seines vorgesehenen Einsatzbereiches „mit vertretbarem Aufwand“ zur Untersuchung von Entwicklungen und Maßnahmen genutzt werden kann. Darunter sind Aspekte wie Ergebnisdarstellung, Rechenzeit, Nutzerfreundlichkeit und Möglichkeit zur Aktualisierung zu berücksichtigen.

Auf Basis dieser genannten Anforderungen werden anschließend konkrete Empfehlungen

- zur Modelltypisierung in Abhängigkeit von Einsatzzweck und Fragestellung (z.B. Festlegung des Analysemaßstabs oder des zeitlichen Betrachtungszeitraums),
- zu Modellobjekten (z.B. Verkehrsmittel, Gutarten, etc.),
- zum Modellaufbau (z.B. Modellierungsschritte, -methoden, etc.),
- zur Parametrisierung, Validierung und Kalibrierung von Wirtschaftsverkehrsnachfragemodellen (z.B. Parameterwahl, Gütemaße, Modelltests, etc.)
- zur Dokumentation von Wirtschaftsverkehrsnachfragemodellen (z.B. Dokumentation über Eingangsdaten oder Qualitätssicherung)

gegeben. Dabei erfolgt zudem jeweils eine Differenzierung nach drei räumlichen Betrachtungsebenen (national, regional / kommunal, lokal / unternehmensbezogen).

Abschließend beinhaltet das Empfehlungspapier Prüffragen bzw. Checklisten, welche als Hilfestellung bei der praktischen Anwendung der Empfehlungen vorgesehen sind.

### 3.4 Öffentliche Ausschreibungen zu Verkehrsnachfragemodellen in Deutschland

In Deutschland gibt es regelmäßig Ausschreibungen zu Verkehrsnachfragemodellen. Tabelle 3-7 zeigt das Ergebnis einer Auswertung ausgewählter Ausschreibungen. Die Auswertungen wurden – ähnlich wie die oben dargestellten Veröffentlichungen – nach den folgenden Kriterien klassifiziert:

- Enthält die Ausschreibung Angaben zum Einsatzbereich des Modells?
- Enthält die Ausschreibung Anforderungen an den Wirtschaftsverkehr?
- Ist mit der Ausschreibung die Durchführung einer Haushaltsbefragung verbunden?
- Enthält die Ausschreibung Vorgaben für die Prognose?
- Enthält die Ausschreibung Vorgaben für die Dokumentation?
- Enthält die Ausschreibung Vorgaben zum Netzmodell?
- Enthält die Ausschreibung Vorgaben zur Modellstruktur?
- Enthält die Ausschreibung Vorgaben zur Qualitätssicherung?

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Bandbreite der Ausschreibungen von allgemeinen, qualitativen Aussagen bis hin zu sehr spezifischen Anforderungen reicht.

Stadt Jahr	Umfang Einwohner Ausdehnung	Einsatzbereich Wirtschaftsverkehr HH-Befragung Prognose Dokumentation	Vorgaben Netzmodell	Vorgaben Modellstruktur	Qualitäts- kenngrößen
Stuttgart 2009	Seiten 24 U_EW 2,60 Mio. U_km² 3.700	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input checked="" type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ K, W ZW K, W MW K, W VS K, W RZ K, W Konv K Test S
Hamburg 2014	Seiten 48 U_EW 5,30 Mio. U_km² 28.000	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input checked="" type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ K ZW K MW K VS - RZ - Konv - Test S
Kiel 2015	Seiten 11 U_EW 725.000 U_km² 3.500	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input checked="" type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ K, W ZW K, W MW K, W VS K, W RZ - Konv - Test (S, R)

Stadt Jahr	Umfang Einwohner Ausdehnung	Einsatzbereich Wirtschaftsverkehr HH-Befragung Prognose Dokumentation	Vorgaben Netzmodell	Vorgaben Modellstruktur	Qualitäts- kenngrößen
Freiburg 2016	Seiten 29 U_EW 1,67 Mio. U_km² 7.000	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input checked="" type="checkbox"/> HHB <input checked="" type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ K, W ZW K, W MW K, W VS K, W RZ K, W Konv - Test S
Bielefeld 2017	Seiten 14 U_EW 1,3 Mio. U_km² 3.000	EB <input type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input checked="" type="checkbox"/> WZ <input type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ - ZW - MW - VS K, W RZ - Konv - Test -
Tübingen 2017	Seiten 14 U_EW k.A. U_km² k.A.	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input type="checkbox"/>	ZE <input type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input type="checkbox"/>	ERZ - ZW K MW K VS K RZ K Konv - Test S
Velbert 2017	Seiten 9 U_EW 80.000 U_km² 75	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input type="checkbox"/> ÖVA <input type="checkbox"/> UR <input type="checkbox"/>	PG <input type="checkbox"/> WZ <input type="checkbox"/> VM <input type="checkbox"/> MS <input type="checkbox"/>	ERZ - ZW - MW - VS - RZ - Konv - Test -
Heidelberg 2018	Seiten 16 U_EW 1,5 Mio. U_km² 3.000	EB <input checked="" type="checkbox"/> WV <input checked="" type="checkbox"/> HHB <input type="checkbox"/> Prog <input checked="" type="checkbox"/> Doku <input checked="" type="checkbox"/>	ZE <input checked="" type="checkbox"/> IVA <input checked="" type="checkbox"/> ÖVA <input checked="" type="checkbox"/> UR <input checked="" type="checkbox"/>	PG <input checked="" type="checkbox"/> WZ <input checked="" type="checkbox"/> VM <input checked="" type="checkbox"/> MS <input checked="" type="checkbox"/>	ERZ K ZW K, W MW K, W VS K, W RZ K, W Konv - Test S
<b>Legende</b> U_EW Einwohner im Untersuchungsraum U_km² Fläche des Untersuchungsraums Für die anderen Abkürzungen siehe Tabelle 3-1 auf Seite 39.					

Tabelle 3-7: Überblick über wesentliche Anforderungen zum Aufbau und zur Qualität von Verkehrsnachfragemodellen aus öffentlichen Ausschreibungen (sortiert nach Jahr).

## 4 Einsatzbereiche von Verkehrsnachfragemodellen und gewünschte Modellergebnisse

Ein Verkehrsnachfragemodell wird zu einem bestimmten Zweck erstellt. Es soll Kenngrößen des Verkehrsangebots und der Verkehrsnachfrage für den heutigen Zustand und für zukünftige Zustände bereitstellen und so Grundlagen für verkehrsplanerische Entscheidungen liefern. Die zukünftigen Zustände können dabei Entwicklungen und Maßnahmen umfassen:

- Entwicklungen umfassen Veränderungen, die nicht von der Verkehrsplanung beeinflusst werden können. Dazu gehören die Änderung der Einwohnerzahl, die Änderung der soziodemographischen Struktur der Bevölkerung, Preisänderungen für Energie oder technische Entwicklungen bei der Fahrzeugflotte.
- Maßnahmen umfassen Veränderungen, die von der Raum- oder Verkehrsplanung beeinflusst werden können. Dazu gehören u.a. raumplanerische, infrastrukturbezogene, betriebliche, monetäre, ordnungspolitische und bewusstseinsbildende Maßnahmen.

Damit ein Verkehrsnachfragemodell diesen Zweck erfüllen kann, müssen vom Modellnutzer vor der Modellerstellung folgende Fragen zum Einsatzbereich eines Modells beantwortet werden:

- Was ist der Anlass für die Modellerstellung?
- Sollen andere planende Institutionen bei der Sammlung von Anforderungen berücksichtigt werden?
- Welchen Zeitraum soll das Modell abbilden?
- Welche Entwicklungen soll das Modell berücksichtigen können?
- Welche Maßnahmen sollen mit dem Modell untersucht werden?
- Welche Kenngrößen soll das Modell als Ergebnis liefern?

Aus dem Einsatzbereich des Modells ergeben sich die Anforderungen an die Modellerstellung, die dann in einer Modellspezifikation formuliert werden. Hinweise und Empfehlungen zur Modellerstellung finden sich in Kapitel 5. Im Rahmen dieses Projektes wurde zudem eine Checkliste für die Einsatzbereiche von Verkehrsnachfragemodellen und die gewünschten Modellergebnisse erstellt (siehe Anlage 3).

### 4.1 Anlass der Modellerstellung

Der Anlass einer Modellerstellung ergibt sich in der Regel aus raum- und verkehrsplanerischen Aufgabenstellungen. In Tabelle 4-1 sind typische Aufgabenstellungen zusammengestellt. Aus der Aufgabenstellung können bereits besondere Anforderungen an die Modellergebnisse resultieren. Das ist beispielsweise der Fall, wenn für die verkehrstechnische Bemessung nicht nur tägliche, sondern auch stündliche Verkehrsstärken benötigt werden. Da in einer Stadtregion häufig mehr als eine Aufgabenstellung bearbeitet werden muss, ist eine Abstimmung zwischen den planenden Institutionen (Regionalplanung, städtische Verkehrsplanung, ÖV-Aufgabenträger) sinnvoll. Es wird in der Regel effizienter sein, ein Modell für mehrere Modellnutzer zu erstellen als mehrere Einzelmodelle.

Aufgabenstellung	Regelwerke	Besondere Anforderungen an die Modellergebnisse
Raumplanung (Regionale Entwicklungspläne, Flächennutzungsplanung, Bebauungsplanung)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• u.U. Verkehrsleistung differenziert nach Teilräumen</li> <li>• u.U. Verkehrsleistung differenziert nach Wohnort oder Arbeitsort („Welche Teilräume verursachen den Verkehr?“)</li> </ul>
Verkehrsträgerübergreifende strategische Planung (Verkehrsentwicklungsplanung)	RIN [51]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsnachfrage für alle Modi des Personenverkehrs und für Lkw</li> <li>• Verkehrsstärken mindestens für Pkw, Lkw und ÖV</li> <li>• u.U. tageszeitlich differenzierte Nachfrage</li> </ul>
Straßenplanung	RAA [49] RAL [54] RASt [50] RWS [44]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsstärken für die maßgebende Bemessungsstunde differenziert nach Leichtverkehr und Schwerverkehr</li> </ul>
ÖPNV-Angebotsplanung (Nahverkehrsplanung, Linienerechnung)	Standardisierte Bewertung [77]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsstärken für einzelne Linien</li> <li>• Erlöse aus Fahrkarten</li> </ul>
Radverkehrsplanung		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsstärken für den Radverkehr</li> </ul>
Volkswirtschaftliche Untersuchungen	RWS [44] Standardisierte Bewertung [77]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken (DTV) bzw. Jahreswerte, nicht nur die durchschnittlichen werktäglichen Verkehrsstärken (DTV<sub>WS</sub>)</li> </ul>
Verkehrssicherheitsuntersuchungen	ESN [45]	
Luftreinhaltung	Bundesimmissionsschutzgesetz [71]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ableitung von Schadstoffemissionen aus den Verkehrsstärken</li> <li>• Verkehrszustände (Stau, gesättigter, dichter und flüssiger Verkehr)</li> <li>• eventuell Verkehrsstärken differenziert nach Fahrzeugflotte (Euro-Norm, Antriebstechnologie)</li> </ul>
Lärmaktions- bzw. Lärminderungsplanung	VBUS [130] RLS-19 [58]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsstärken differenziert nach Tag (06:00 - 22:00) und Nacht (22:00 - 06:00)</li> <li>• Ableitung von Lärmemissionen für Straßenquerschnitte aus den Verkehrsstärken (Summe aus beiden Richtungen)</li> </ul>
Leistungsfähigkeitsuntersuchungen	HBS [55]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsstärken für die maßgebende Bemessungsstunde</li> <li>• Verkehrsstärken für Abbieger</li> </ul>
Strategisches Verkehrsmanagement (Baustellenplanung, Planung eines Störfallmanagements)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsstärken differenziert nach Tageszeit</li> </ul>

Tabelle 4-1: Checkliste zum Anlass einer Modellerstellung: Für welche Aufgabenstellungen soll das Modell eingesetzt werden?

## 4.2 Festlegung Bezugszeitraum

Ein Verkehrsnachfragemodell ermittelt die Verkehrsnachfrage in einem Untersuchungsraum für einen vorzugebenden Bezugszeitraum. Dieser Zeitraum wird in der Regel einen Tag umfassen und die an diesem Tag stattfindenden Ortsveränderungen von Personen und Gütern durch Verhaltensparameter nachbilden, die im Mittel an diesem Tag zu erwarten sind. Die meisten städtischen und regionalen Modelle beziehen sich auf einen Werktag in der Schulzeit. Sie ermitteln als Verkehrsstärke eine durchschnittliche werktägliche Verkehrsstärke DTV<sub>WS</sub>. Für volkswirtschaftliche Untersuchungen können aber auch Jahreswerte oder der mittlere tägliche Verkehr DTV erforderlich sein. Tabelle 4-2 zeigt mögliche Bezugszeiträume, die einem Nachfragemodell zugrunde gelegt werden können.

Bezeichnung	Bezugszeitraum	Hinweise
Werktagmodell (DTV <sub>WS</sub> )	Es wird ein mittlerer Werktag Montag bis Freitag in der Schulzeit abgebildet.	Es wird angenommen, dass sich Menschen an jedem Werktag weitgehend gleich verhalten.
Tagesmodell (DTV)	Es wird der mittlere Tag eines Jahres abgebildet.	Da sich das Mobilitätsverhalten zumindest zwischen Werktagen und Wochenenden deutlich unterscheidet, kann das Mobilitätsverhalten eines durchschnittlichen Tages nicht modelliert werden. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lösung 1: Es werden ausgewählte Tage (Mo-Fr, Sa, So) modelliert und dann gewichtet aufsummiert.</li> <li>• Lösung 2: Die Werktagmatrix wird mit einem Matrixkorrekturverfahren an gezählte DTV-Werte angepasst (siehe Kapitel 5.1.10).</li> </ul>
Verkehrstagesmodell	Es wird ein ausgewählter Verkehrstag abgebildet. Dieser Verkehrstag umfasst eine Menge von Kalendertagen mit ähnlichen Eigenschaften.	Verkehrstagesmodelle können für Gebiete geeignet sein, in denen hohe Nachfrage nicht an Werktagen auftritt (z.B. Urlaubsgebiete). Es sind Daten zum Mobilitätsverhalten für den gewählten Verkehrstag erforderlich.
Wochenmodell	Es werden mehrere Tage einer Woche abgebildet.	Für Dimensionierungsaufgaben in Gebieten mit täglich schwankender Verkehrsnachfrage kann ein Wochenmodell sinnvoll sein (z.B. Schienenfernverkehr). Es sind Daten zum Mobilitätsverhalten und zum Verkehrsangebot (Fahrpläne) für jeden Wochentag erforderlich.

Tabelle 4-2: Checkliste Bezugszeitraum: Welche Zeiträume sollen das Modell abbilden?

### 4.3 Abzubildende Entwicklungen und Maßnahmen

Tabelle 4-3 zeigt typische Entwicklungen und Maßnahmen, deren Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage für die Verkehrsplanung von Bedeutung sind. Um Aussagen zu den Wirkungen einer Entwicklung oder Maßnahme mit einem Verkehrsnachfragemodell machen zu können, müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

- **Modellierbarkeit:** Die Entwicklung / Maßnahmen müssen im Modell abbildbar sein, d.h. es muss im Modell geeignete Variablen geben, die die Eigenschaften der Entwicklung / Maßnahme beschreiben.
- **Wirksamkeit:** Eine Entwicklung / Maßnahme ist dann wirksam, wenn sie die Verkehrsnachfrage in Teilen des Netzes messbar verändert.

Tabelle 4-3 enthält in den letzten beiden Spalten eine Einschätzung zur Modellierbarkeit und Wirksamkeit der Entwicklungen und Maßnahmen. Diese Einschätzung soll Modellnutzern einen Eindruck vermitteln, was ein Verkehrsnachfragemodell, das nach dem in Kapitel 5 beschriebenen Regeln erstellt wurde, leisten kann und wo die Grenzen eines Verkehrsnachfragemodells liegen. Diese Einschätzung soll durch folgende Beispiele veranschaulicht werden:

- **Infrastrukturmaßnahmen:** Der Bau einer neuen Straße oder die Einführung einer ÖV-Linie kann in einem Verkehrsnachfragemodell durch das Einfügen geeigneter Netzelemente (z.B. Strecken) gut abgebildet werden. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass die Straße bzw. die Linie im Modell und nach der Eröffnung auch in der Realität eine messbare Verkehrsstärke aufweisen wird. Die Wirkungen von Maßnahmen dieser Kategorie lassen sich deshalb gut mit Verkehrsnachfragemodellen abschätzen.
- **Verkehrstechnische Maßnahmen:** Die Umgestaltung eines Knotenpunktes kann die Kapazitäten und Wartezeiten verändern. Aussagen zur Wirksamkeit einer derartigen technischen Maßnahme sind

jedoch aus zwei Gründen schwierig. Um Wartezeiten an Knoten realistisch nachzubilden, müssen die Fahrstreifen und die Knotensteuerung detailliert modelliert und eine feine Verkehrszelleneinteilung gewählt werden. Die Verkehrsstärken auf einem Abbieger sind relativ gering. Deshalb kann die relative Abweichung zwischen Modellwert und Realität hoch sein.

- Ordnungspolitische Maßnahmen: Die Einführung eines Parkraummanagements, bei dem Anwohner von Parkgebühren ausgenommen werden, lässt sich in einem Verkehrsnachfragemodell z.B. durch die Einführung von zellenspezifischen Kosten abbilden, die nach Wegezwecken differenziert werden (hohe Kosten für Wegezwecke mit langen Parkdauern wie Arbeiten, geringe Kosten für Wegezwecke mit kurzer Parkdauer wie Einkaufen, keine Kosten für den Wegezweck nach Hause). Dieser Änderungen können im Modell dazu führen, dass Arbeitswege vom Pkw auf den ÖV verlagert werden. In der Realität kann ein Parkraummanagement durch diese Verlagerung die Parkplatzverfügbarkeit für den Einkaufsverkehr verbessern und so wieder zu mehr Pkw-Fahrten führen. Eine tageszeitabhängige Parkplatzverfügbarkeit ist in Verkehrsnachfragemodellen in der Praxis aber nicht üblich.
- Maßnahmen im Fußverkehr: Diese Maßnahmen sind für Nachfragemodelle meist zu kleinräumig und können in den Netzmodellen nicht ausreichend genau abgebildet werden. Für spezielle Anwendungen, z.B. Fußgängerströme an Bahnhöfen, sind hochaufgelöste Netzmodelle mit kleinen Verkehrszellen erforderlich.
- Maßnahmen des Marketings: Diese Maßnahmen ändern nicht das Verkehrsangebot. Sie dienen stattdessen der Information von Verkehrsteilnehmenden. Damit diese Maßnahmen zu Verhaltensänderungen führen, müssen sich die Präferenzen der Verkehrsteilnehmenden ändern. Hierfür liegen in der Regel keine Daten vor. Entsprechende Daten müssten mit Stated Preference Untersuchungen („Was würden Sie tun, wenn Sie folgende Informationen bekommen?“) geschätzt werden.
- Maßnahmen der Verkehrsleittechnik und des Verkehrsmanagements: Nachfragemodelle bilden Lernprozesse von Verkehrsteilnehmenden nach. Sie berücksichtigen regelmäßig auftretende Störungen, aber keine zufälligen Störungen. Die Wirkung dynamischer Maßnahmen, die auf zufällige Störungen und Ereignisse reagieren, lassen sich deshalb in Nachfragemodellen nur mit zusätzlichen Annahmen zum Verhalten abschätzen.
- Maßnahmen in der Logistik: Insbesondere relevant für ein Wirtschaftsverkehrsnachfragemodell ist die Abbildung von Maßnahmen im Bereich der Logistikplanung. So können Wirtschaftsakteure durch Abbildung ihrer logistischen Strategien im Verkehrsmodell, die verkehrlichen und vor allem betriebswirtschaftlichen Folgen dieser Strategien besser abschätzen. Speziell für den städtischen Güterverkehr ist die Abbildung von Maßnahmen denkbar, welche im Rahmen von City-Logistik-Konzepten ergriffen werden. Darunter fällt u.a. die Berücksichtigung der entsprechenden Tourencharakteristiken oder der notwendigen Infrastruktur, wie z.B. Güterverkehrszentren (GVZ).

Maßnahmenklasse	Entwicklungen und Maßnahmen	Modellierbarkeit	Wirksamkeit
Siedlungsstruktur	Demografische Effekte	+	●
	Erweiterung / Planung von Wohn-, Gewerbe- und Industriegebieten	+	●
	Singuläre Verkehrserzeuger z.B. Flughafen, Messe, Freizeitpark, Fußballstadien	+	●
Infrastruktur	Straßenneubau, -ausbau, -rückbau	+	●
	Liniennetzplanung ÖV	+	●
	Bau von Park+Ride Verknüpfungspunkten	○	○
	Bau von Radverkehrsanlagen	○	○
Mobilitätswerkzeuge	Änderung Motorisierungsgrad und ÖV-Zeitkartenbesitz	+	●
	Einführung neuer Mobilitätsangebote (Vehiclesharing, Ridesharing)	○	?
Ordnungspolitisch	Änderungen der zulässigen Geschwindigkeit	+	●
	Umweltzonen	○	-
	Parkraummanagement	○	○
	Durchfahrtsverbote	+	○
Kostenbeeinflussend	Fahrpreise	+	●
	Kraftstoffpreise	+	●
	Straßenbenutzungsgebühren	+	●
	Parkraumbewirtschaftung	○	○
ÖV-Betrieb	Taktveränderung	+	○
	Differenzierte Fahrplanänderung	+	○
	Änderung der Fahrzeugkapazität	○	○
Sharingsysteme	Vehiclesharing-Angebote (Pkw, Rad)	○	?
	Ridesharing-Angebote	○	?
	Verknüpfung von ÖV und Sharingsystemen	○	?
Verkehrstechnisch	Dimensionierung von Knotenpunkten und Verflechtungen	○	○
	Verkehrsleitsysteme	○	○
	Verkehrsmanagement, Baustellenmanagement	○	○
Logistik	Standorte für Güterverteilzentren und Güterverkehrszentren	○	●
	Logistische Strategien (City-Logistik)	○	?
Fahrzeugtechnisch	Änderung der Fahrzeugflottenzusammensetzung	○	-
	Verfügbarkeit hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge	○	?
Bewusstseinsbildend	Marketing, Incentives	-	-
Events	Planung besonderer Events	○	○
<b>Legende</b>			
Modellierbarkeit	+	Maßnahme ist in einem Nachfragemodell gut abbildbar	
	○	Maßnahme ist in einem Nachfragemodell eingeschränkt oder aufwändig abbildbar	
Wirksamkeit bezogen auf die Nachfrage	-	Maßnahme ist in einem Nachfragemodell nicht oder nur schwer abbildbar	
	?	Wirkung der Maßnahme ist nicht ausreichend bekannt	
	-	Wirkung der Maßnahme ist klein und in der Realität nicht messbar	
	○	Wirkung der Maßnahme ist klein und in der Realität nur eingeschränkt messbar	
	●	Wirkung der Maßnahme ist zumindest lokal deutlich und in der Realität messbar	
	●	Wirkung der Maßnahme ist zumindest lokal groß und in der Realität gut messbar	

Tabelle 4-3: Checkliste Einsatzbereiche: Welche Entwicklungen und Maßnahmen sollen berücksichtigt werden?

#### 4.4 Gewünschter Modelloutput

Aus den Einsatzbereichen des Modells leiten sich dann die Anforderungen an die Kenngrößen ab, die mit dem Modell ermittelt werden sollen. Tabelle 4-4 gibt einen Überblick über Kenngrößen, die sich direkt aus der Verkehrsnachfrage (z.B. Zahl der Wege, Verkehrsstärke) ergeben oder die sich aus der Verkehrsnachfrage ableiten lassen (z.B. Emissionen). Grundsätzlich ist hier für den Güterverkehr auch die Ableitung der Kenngröße Tonnenkilometer aus der Verkehrsnachfrage denkbar. Je nach Einsatzbereich können oder müssen die Kenngrößen nach Modus Tageszeit, Wegezweck, Teilräumen und bestimmten Netzelementen (Strecke, Abbieger, ÖV-Linie) differenziert werden.

Kenngröße	Differenzierung				
	Modus	Wegezweck / Güterklasse	Tageszeit	Teilräume	Netzelemente
Anzahl der Wege	●	○	○	○	
Verkehrsstärke	●	○	○		○
Personenkilometer	●	○	○	○	○
Fahrzeugkilometer	●	○	○	○	○
Zeitaufwand	●	○	○	○	○
Auslastung	●		○		○
Umsteigehäufigkeit					○
Linienbeförderungsfälle		○		○	○
Betriebskosten ÖV				○	○
Erlöse ÖV		○		○	○
Einnahmen MIV		○		○	
Logistische Kenngrößen (Anzahl Touren, Tonnenkilometer)	●	○	○	○	○
Kraftstoffverbrauch				○	○
Schadstoffemission			○	○	○
Lärmemission			○		○
Eine Differenzierung ist ● für alle Einsatzbereiche üblich ○ für spezielle Einsatzbereiche üblich ○ bei Bedarf möglich eine Differenzierung ist nicht üblich					

Tabelle 4-4: Checkliste Kenngrößen: Welche Kenngrößen soll das Modell liefern und in welcher Differenzierung?

#### 4.5 Modellspezifikationsgenerator

Der Modellspezifikationsgenerator ist ein Tool, das Einsatzbereiche und gewünschte Modellergebnisse erfasst und daraus Anforderungen an die Modellerstellung ableitet. Die Anforderungen können als Grundlage für die Erstellung einer Modellspezifikation oder als Grundlage für die Erstellung einer Leistungsbeschreibung genutzt werden.

Dieser Modellspezifikationsgenerator baut auf einem Word-Template auf und ergänzt das Dokument durch Textbausteine. Die Textbausteine werden regelbasiert ausgewählt. Grundlage für die Auswahl sind allgemeine Angaben zum Anlass der Modellerstellung:

- Angaben zur Struktur des Untersuchungsraumes,
- Angaben zur Veranlassung der Modellerstellung,
- Angaben zu Entwicklungen und Maßnahmen, die untersucht werden sollen,
- Festlegung von Kenngrößen, die mit dem Modell berechnet werden sollen.

Der auf diese Weise erstellte Text muss dann vor der weiteren Verwendung geprüft und überarbeitet werden. Der Text stellt nur einen Textvorschlag dar, die Verantwortung für die Inhalte liegt beim Nutzer des Modellspezifikationsgenerators.

Der Modellspezifikationsgenerator ist eine eigenständige Datei, die in Anlage 6 beschrieben ist. Anlage 7 zeigt eine Vorlage für eine Leistungsbeschreibung, die mit dem Modellspezifikationsgenerator erzeugt werden kann.

## 5 Hinweise und Empfehlungen für den Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen

Dieses Kapitel gibt Hinweise und Empfehlungen zur Verkehrsnachfragemodellierung im Personen- und Wirtschaftsverkehr, die Modellbesteller und Modellersteller bei der Erstellung einer Modellspezifikation unterstützen sollen. Eine Modellspezifikation soll Aussagen zu den folgenden Punkten beinhalten:

- Einsatzbereiche des Modells und Kenngrößen, die mit dem Modell ermittelt werden sollen,
- Modelltypen, erforderliche Modellstufen und Abbildung von Wahlentscheidungen,
- Abgrenzung des Planungs- und Untersuchungsraums,
- Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur,
- Abbildung des Verkehrsangebots,
- Abbildung der Verkehrsnachfrage,
- Abbildung externer Verkehre und des Wirtschaftsverkehrs,
- Anforderungen an die Prognose und
- verfügbare und erforderliche Daten.

Das Kapitel gibt Hinweise und Empfehlungen für zwei Arten von Verkehrsnachfragemodellen:

- Modellart 1: Der in diesen Modellen abgebildete Untersuchungsraum wird maximal ein Gebiet von 100 km x 100 km abdecken. In diesem Untersuchungsraum dominieren Verbindungen der Verbindungsfunktionsstufen II bis IV nach RIN [51], die in den RIN als überregional, regional und nahräumig bezeichnet werden. Der Anteil des Fernverkehrs an der Verkehrsleistung, der mit dem Modell für den Untersuchungsraum berechnet wird, ist dementsprechend gering. Die Dauer der meisten im Modell abgebildeten Wege ist kürzer als 60 Minuten. Das Verkehrsnetz ist dicht, die Auslastung in vielen Bereichen hoch. In der Regel gibt es im Untersuchungsraum einen Ort mit hoher Zentralität. Modellart 1 ist typisch für städtische, regionale und überregionale Verkehrsnachfragemodelle.
- Modellart 2: Der in diesen Modellen abgebildete Untersuchungsraum umfasst einen Großraum mit mehreren Zentren von nationaler Bedeutung oder ein ganzes Bundesland. In diesem Untersuchungsraum dominieren Verbindungen der Verbindungsfunktionsstufen I bis II nach RIN [51], die in den RIN als großräumig und überregional bezeichnet werden. Der Anteil des Fernverkehrs an der Verkehrsleistung ist hoch. Wege im Untersuchungsraum, die länger als 60 Minuten dauern, werden im Modell explizit abgebildet. Das Verkehrsnetz umfasst viele Außerortsstraßen und ist weniger dicht. In der Regel gibt es im Untersuchungsraum mehrere Orte mit hoher Zentralität. Modellart 2 ist typisch für großräumige / teilnationale Modelle.

## 5.1 Abbildung der Entscheidungsprozesse (Modellstufen)

### 5.1.1 Diskrete Entscheidungsmodelle

Jeder bewusst durchgeführten Handlung liegt ein Entscheidungsprozess zugrunde, so auch bei Wahlalternativen im Verkehr. Zur Modellierung dieser Entscheidungen der Menschen ist neben der Beschreibung der Alternativen eine Entscheidungsregel, die den „inneren Mechanismus“ beschreibt, notwendig. Wahlentscheidungen im Verkehr sind diskreter Natur, d.h. es gibt eine endliche Anzahl an Alternativen, aus der die Verkehrsteilnehmenden in einer Entscheidungssituation genau eine wählen können. Zur Modellierung werden diskrete Entscheidungsmodelle herangezogen, die i.d.R. auf der Annahme der Nutzenmaximierung als Entscheidungsregel beruhen.

Bei diesem Konzept werden die untereinander gewichteten Eigenschaften (z.B. Reisezeit und Reisekosten) der Alternativen in einer Nutzenfunktion zu einem Skalenwert (Nutzen) zusammengefasst. Der Nutzen ist dabei ein Maß für die Attraktivität der jeweiligen Alternative und dient als Entscheidungsgrundlage der Verkehrsteilnehmenden für die Wahl der optimalen Alternative. So wird jene Alternative präferiert, die den höchsten Nutzen aufweist. Die Eigenschaften der Alternativen stellen dabei objektive und die Gewichte subjektive Einflussgrößen (individuelle Präferenzen) im Entscheidungsprozess dar.

- **Deterministische Entscheidungsmodelle:** Wenn alle Entscheider einer Gruppe auf der Basis perfekter Informationen entscheiden und alle entscheidungsrelevanten Einflussgrößen im Modell berücksichtigt werden, wird das Entscheidungsmodell deterministisch genannt. Der Nutzen ergibt sich dabei direkt aus den objektiv messbaren Eigenschaften der Alternativen. Das kann dazu führen, dass alle Entscheider dieselbe Alternative wählen. Beim deterministischen Nutzergleichgewicht werden die Entscheider so auf die Alternativen aufgeteilt, dass der Aufwand für alle Alternativen des Choice Sets gleich groß ist.
- **Stochastische Entscheidungsmodelle:** Im Allgemeinen ist es nicht möglich, alle relevanten Einflussgrößen auf den Nutzen exakt zu bestimmen. Darüber hinaus verfügen Verkehrsteilnehmende häufig nicht über vollständige Informationen und kennen beispielsweise die Reisezeit nicht genau. Sie schätzen somit den realen Nutzen der Alternative für sie nicht vollständig richtig ein. Um diese Ungenauigkeiten und Unvollständigkeiten modellseitig zu berücksichtigen, wird der Nutzenfunktion eine zusätzliche zufallsverteilte stochastische Komponente angefügt. Je nach angenommener Zufallsverteilung resultiert beispielsweise das Logit-Modell (Gumbelverteilung) oder das Probit-Modell (Normalverteilung).

Bei stochastischen Modellen spielt die Ähnlichkeit bzw. Eigenständigkeit der Alternativen für die Modellformulierung eine wichtige Rolle. In der Literatur, z.B. Ben-Akiva & Lerman [9], wird als Beispiel für die Ähnlichkeit zweier Alternativen das Red Bus / Blue Bus Problem genannt. Angenommen es gibt für ein Moduswahlmodell die beiden Alternativen Pkw und Bus. Für eine bestimmte Relation  $o-d$  ergibt sich unter Annahme identischer Nutzenwerte eine Wahlwahrscheinlichkeit für den Pkw von 50 % und dementsprechend für den Bus ebenfalls von 50 %. Wird jetzt die eine Hälfte der Busse rot lackiert und die andere Hälfte blau und definiert man ein Wahlmodell, dass jetzt die drei Alternativen Pkw, roter Bus und blauer Bus zur Wahl stehen, ergibt sich ein Aufteilungsverhältnis von 1/3 für den Pkw, 1/3 für den

roten Bus und 1/3 für den blauen Bus, Dies ist offensichtlich ein unrealistisches Modell. Der Grund dafür liegt in der Annahme über die zufallsverteilte stochastische Komponente. Diese Komponente ist bei den beiden Alternativen roter Bus und blauer Bus identisch. Diese Ähnlichkeit (in diesem Fall Gleichheit) von Alternativen muss in der Formulierung von Wahlmodellen berücksichtigt werden.

<p><b>Nutzenfunktion</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzen <math>v</math> der Alternative <math>i</math> für Entscheider der Nachfragegruppe <math>g</math></li> </ul>	$v_{gi} = \beta_{0gi} + \beta_{1g}x_{1i} + \beta_{2g}x_{2i} + \dots$ $= \beta_{0gi} + \sum_k \beta_{kg}x_{ki}$ <p style="text-align: right;">Beispiel einer linearen Nutzenfunktion</p>
<p><b>Bewertungsfunktion</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bewerteter Nutzen <math>b</math> der Alternative <math>i</math> für Entscheider der Nachfragegruppe <math>g</math></li> </ul>	$b_{gi} = f(v_{gi})$
<p><b>Anteil einer Alternative</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Anteil <math>p</math> der Alternative <math>i</math> für Entscheider der Nachfragegruppe <math>g</math></li> </ul>	$p_{gi} = \frac{b_{gi}}{\sum_{i \in I} b_{gi}} = \frac{f(v_{gi})}{\sum_{i \in I} f(v_{gi})}$
<p><b>Parameter</b></p> <p><math>I</math> Menge der Alternativen (Choice Set)</p> <p><math>g</math> Nachfragegruppe : Eine Menge von Entscheidern mit ähnlichen Präferenzen, z.B. Wegezweck x Personengruppe</p> <p><math>\beta_{0gi}</math> Alternativenspezifische Konstante</p> <p><math>\beta_{kg}</math> Parameter der Aufwandsempfindlichkeit der Nachfragegruppe <math>g</math> bei der Alternativenwahl für die <math>k</math>. Kenngröße der Alternative.</p>	
<p><b>Variablen</b></p> <p><math>x_{ki}</math> Wert der Kenngröße <math>k</math> zur Beschreibung der Eigenschaften der Alternative <math>i</math></p>	
<p><b>Beispiele für Bewertungsfunktionen (Auswahl)</b></p> <p>Bezeichnung des Entscheidungsmodells: Logit          Funktionsbezeichnung: Exponentialfunktion          Funktionsform:</p> $f(v_{gi}) = e^{\alpha_g \cdot v_{gi}}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>abfallend ohne Wendepunkt</li> <li>ein Funktionsparameter <math>\alpha</math></li> </ul> <p>Eigenschaften:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>bei der Berechnung des Anteils ist ausschließlich die Nutzendifferenz entscheidend</li> <li>Elastizität steigt linear an</li> <li>reagiert im Nahbereich schwächer als im Fernbereich</li> </ul>	
<p>Bezeichnung des Entscheidungsmodells: Kirchoff          Funktionsbezeichnung: Potenzfunktion          Funktionsform:</p> $f(v_{gi}) = v_{gi}^{\alpha_g}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>abfallend ohne Wendepunkt</li> <li>ein Funktionsparameter <math>\alpha</math></li> </ul> <p>Eigenschaften:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>bei der Berechnung des Anteils ist ausschließlich das Nutzenverhältnis entscheidend</li> <li>Elastizität ist konstant</li> <li>reagiert in allen Entfernungsbereichen gleich</li> </ul>	

$f(v_{gi}) = \frac{1}{(1 + v_{gi})^{\varphi(v_{gi})}}$ $\varphi(v_{gi}) = \frac{\alpha_{1g}}{1 + e^{(\alpha_{2g} - \alpha_{3g} \cdot v_{gi})}}$	<p>Bezeichnung des Entscheidungsmodells: EVA-Modell          Funktionsbezeichnung: EVA-Funktion          Funktionsform:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Halbglockenkurve</li> <li>• abfallend mit Wendepunkt</li> <li>• drei Funktionsparameter <math>\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3</math></li> </ul> <p>Eigenschaften:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• die EVA-Funktion kombiniert die Eigenschaften der Exponential- und der Potenzfunktion</li> <li>• Elastizität steigt im Nahbereich und sinkt dann wieder</li> <li>• reagiert im Nahbereich und im Fernbereich schwächer als im mittleren Wertebereich</li> </ul>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abbildung 5-1: Grundstruktur stochastischer Entscheidungsmodelle.

## Hinweise und Empfehlungen zu Entscheidungsmodellen

<p><u>Hinweise</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• In einem Verkehrsnachfragemodell werden häufig nicht alle Entscheidungen der Realität durch Entscheidungsmodelle abgebildet. Ein Beispiel hierfür sind die bei der Aktivitätenwahl üblicherweise fest vorgegebenen Häufigkeiten einzelner Wegezwecke einer Personengruppe (Parameter der Verkehrserzeugung). Gleiches gilt bei der Abfahrtszeitwahl durch die Vorgabe von Anteilen für einzelne Zeitintervalle (Parameter Stundenanteile).</li> <li>• In mikroskopischen Nachfragemodellen entscheidet sich eine modellierte Person für genau eine Alternative, in makroskopischen Modellen werden für eine Gruppe von Personen die Anteile bestimmt, die auf die jeweilige Alternative entfallen.</li> <li>• Bewertungsfunktionen unterscheiden sich durch ihre Elastizitäten. Die Elastizität der Bewertungsfunktion beeinflusst maßgebend die Reaktion in der Prognose. Erläuterungen zu Elastizitäten finden Sie in Anlage 2.2.1.</li> </ul> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Für multimodale städtische und regionale Modelle sind für die Ziel- und Moduswahl Entscheidungsmodelle vom Typ Logit mit einer linearen Nutzenfunktion ausreichend.</li> <li>• Großräumige Modelle, die Entscheidungssituationen im Nahbereich und im Fernbereich nachbilden, sollten entweder Bewertungsfunktionen mit mehr als einem Parameter einsetzen (Halbglockenkurven) oder die Nachfrage in Gruppen des Nahverkehrs- und des Fernverkehrs segmentieren.</li> </ul>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabelle 5-1: Hinweise und Empfehlungen zu Entscheidungsmodellen.

### 5.1.2 Aktivitätenwahl in der Verkehrserzeugung

Verkehrserzeugungsmodelle bilden die Aktivitätenwahl der Bewohner des Untersuchungsraumes nach. Sie ermitteln das Verkehrsaufkommen, d.h. die Zahl von Ortsveränderungen, die von der Bevölkerung einer Verkehrszelle innerhalb eines bestimmten Zeitraumes (z.B. eines Werktages) durchgeführt werden. Verkehrserzeugungsmodelle berechnen das Verkehrsaufkommen einer Verkehrszelle differenziert nach Wegezwecken aus Strukturgrößen dieser Zelle (z.B. Einwohner, Arbeitsplätze, Einkaufsflächen) und spezifischen Mobilitätsraten. Dabei wird zwischen dem produzierten Verkehr an der Quelle (Produktion) einer Ortsveränderung und dem angezogenen Verkehr (Attraktion) am Ziel einer Ortsveränderung unterschieden.

Bei Einzelwegmodellen wird die Verkehrserzeugung für die Produktion und die Attraktion unterschiedlich berechnet. Die Produktion findet für alle verhaltensähnlichen Gruppen und jeden Wegezweck je Verkehrszelle statt. Die Berechnung der Attraktion wird auf der Ebene von Quelle-Ziel-Gruppen (z.B. Wohnen – Arbeiten) durchgeführt. Die Mobilitätsraten der verhaltensähnlichen Gruppen und die Attraktionsraten der Quelle-Ziel-Gruppen können direkt aus Haushaltsbefragungen mit Wegetagebüchern übernommen werden. Bei der Verkehrserzeugung sollten drei Wegetypen differenziert werden:

1. Wege, die am Wohnort beginnen (Wohnort = Quelle)
2. Wege, die am Wohnort enden (Wohnort = Ziel)
3. Wege ohne direkten Wohnortsbezug (Wohnort ist weder Quell- noch Zielseite)

Wege vom Typ 1 und 2 sind sogenannte heimatgebundene Wege, deren Zahl sich unmittelbar aus der Zahl der Einwohner an der Quelle (Typ 1) oder am Ziel (Typ 2) ableiten lassen. Um sicherzustellen, dass innerhalb eines Tages für jede Zelle die Zahl der produzierten Wege der Zahl der angezogenen Wege entspricht, sind bei Wegen vom Typ 3 in der Verkehrserzeugung und in der Zielwahl zusätzliche Randbedingungen einzuhalten.

Bei Aktivitätenkettenmodellen werden in der Verkehrserzeugung in der Wohnzelle nicht einzelne Wege, sondern ganze Aktivitätenketten erzeugt, die eine Folge von Aktivitäten vom Verlassen der Wohnung bis zur Rückkehr beschreiben. Die Häufigkeiten von Aktivitätenketten können ebenfalls aus Wegetagebüchern abgeleitet werden. Lange Aktivitätenketten, die selten auftreten (z.B. Wohnen – Einkaufen – Einkaufen – Einkaufen – Wohnen), müssen dabei auf einfachere Ketten reduziert werden.

<p><b>Verkehrserzeugung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• von der Nachfragegruppe <math>g</math> in Zelle <math>o</math> produzierte Ortsveränderungen <math>d</math></li> <li>• von der Nachfragegruppe <math>g</math> in Zelle <math>d</math> angezogene Ortsveränderungen <math>d</math></li> </ul>	$d_{go}^p = u_{go}^p \cdot \sum_{k=1}^K \beta_{kg}^p \cdot z_{ok}$ $d_{gd}^a = u_{gd}^a \cdot \sum_{k=1}^K \beta_{kg}^a \cdot z_{dk}$
<p><b>Parameter</b></p> <p><math>g</math></p> <p><math>\beta_{kg}^p, \beta_{kg}^a</math></p> <p><math>u_{gz}^p, u_{gz}^a</math></p>	<p>Nachfragegruppe: Eine Menge von Ortsveränderungen mit gleichen Eigenschaften bezüglich des Wegezwecks. Folgende zusätzliche Differenzierungen sind möglich:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Personengruppe</li> <li>• Raumtyp, wenn Personen abhängig vom Wohnstandort (Stadt, Land) eine unterschiedliche Anzahl von Ortsveränderungen erzeugen.</li> </ul> <p>Produktions- bzw. Anziehungsrate: Zahl der Ortsveränderungen, die von einer Strukturgröße <math>k</math> erzeugt oder angezogen werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• abhängig von: Nachfragegruppe</li> <li>• Datenquelle Analyse: Wegetagebücher, Literatur</li> <li>• Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse</li> </ul> <p>Untersuchungsraumanteil: Anteil der Ortsveränderungen des produzierten bzw. des angezogenen Verkehrs in Zelle <math>z</math>, deren Quelle und Ziel im Untersuchungsraum liegt.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• abhängig von: Verkehrszelle, Nachfragegruppe</li> <li>• Datenquelle Analyse: Erhebungen, Abschätzungen</li> <li>• Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse</li> </ul>
<p><b>Variablen</b></p> <p><math>z_{zk}</math></p>	<p>Wert einer Strukturgröße (z.B. Personen einer Personengruppe, Arbeitsplätze, Einkaufsgelegenheiten)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• abhängig von: Verkehrszelle</li> <li>• Datenquelle: Statistische Ämter, eigene Recherche, kommerzielle Datenanbieter</li> <li>• Datenquelle Prognose: Flächennutzungspläne, Regionalpläne, eigene Recherche</li> </ul>

Abbildung 5-2: Grundstruktur eines Verkehrserzeugungsmodells.

## Hinweise und Empfehlungen zu Verkehrserzeugungsmodellen

### Hinweise

- Die Verkehrserzeugung muss berücksichtigen, dass Zellen am Rand des Untersuchungsraums pro Person weniger Wege erzeugen, die Quelle und Ziel im Untersuchungsraum haben, als Zellen im Kern des Untersuchungsraums. Am Rand entfällt ein größerer Anteil der Wege, auf Wege in den Außenraum. Deshalb sind für jede Zelle und für jeden Wegezweck die Anteile der Wege mit Quelle und Ziel im Untersuchungsraum zu bestimmen. Dieser Anteil wird Untersuchungsraumanteil genannt. Er wird für den produzierten und angezogenen Verkehr differenziert.
- Die Zahl der Ortsveränderungen hängt von der Lebensphase (Ausbildung, Erwerbstätigkeit, Ruhestand, etc.), vom Geschlecht, von den verfügbaren Mobilitätswerkzeugen und von der Lage des Wohnorts (Stadt, Land) ab. In Verkehrsnachfragemodellen wird dieser Zusammenhang über die Personengruppe berücksichtigt. Die Verwendung weiterer Einflussfaktoren (z.B. Wohlstand) liegt ggf. als Ergebnis von Untersuchungen anderer Fachgebiete vor und muss im Einzelfall nachgewiesen werden.
- Personen machen Arbeitswege und dienstliche Wege, d.h. Wege in Ausübung des Berufes. Für dienstliche Wege ist zu klären, ob diese im Personenverkehrsmodell oder in einem Wirtschaftsverkehrsmodell abgebildet werden.
- Es gibt Aktivitätenorte (z.B. Kinderbetreuung, Ausbildung), die vorrangig im Umkreis des Wohnorts (z.B. in der Gemeinde, im Landkreis) liegen. Bei Wegezwecken mit diesen teilsäumlichen Bindungen muss im Rahmen der Verkehrserzeugung geprüft werden, ob die Siedlungsstrukturdaten von Einwohnern (z.B. Zahl der Schüler) und Aktivitätenorten (z.B. Zahl der Schulplätze) in Teilräumen übereinstimmen.

### Modellparameter

- Produktionsraten: Produktionsraten können aus lokalen Mobilitätshebungen oder aus Mobilitätshebungen vergleichbarer Räume (Mobilität in Deutschland (MiD, [91]), Mobilität in Städten (SrV, [124])) abgeleitet werden. Es sind die „Empfehlungen für Verkehrserhebungen“ (EVE) [53] bzw. deren Ergänzung „Hinweise für die Durchführung von Haushaltsbefragungen zum Mobilitätsverhalten“ [57] zu beachten.
- Anziehungsraten: Spezifische Anziehungsraten für die Ermittlung der von einem Aktivitätenort angezogenen Wege können für ausgewählte Einrichtungen (u.a. Großmärkte, Einzelhandelsgeschäfte, Kultur- und Freizeiteinrichtungen) zum Teil aus der Literatur (FGSV: Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen [48] und Bosserhoff [12]) übernommen oder müssen erhoben werden. Bei der Verwendung von Werten aus der Literatur ist Eignung und Aktualität sicherzustellen.

### Empfehlungen

- Die Verkehrserzeugung sollte differenziert nach Wegezwecken erfolgen (siehe Kapitel 5.4.5).
- Wenn eine Prognose erstellt wird, sollte die Verkehrserzeugung Personengruppen unterscheiden (siehe Kapitel 5.4.5), um z.B. veränderte Bevölkerungsstrukturen und deren Mobilitätsverhalten im Zeitverlauf abbilden zu können.
- Die im Modell verwendeten Strukturgrößen, Produktionsraten, Anziehungsraten und die Untersuchungsraumanteile sollten vom Modellersteller für jeden Wegezweck offengelegt werden, so dass die Verkehrserzeugung von Modellnutzern reproduziert werden kann.
- Es sollte ein teilraumbezogener Randsummenausgleich bei Wegezwecken mit teilsäumlichen Bindungen durchgeführt werden.

Tabelle 5-2: Hinweise und Empfehlungen zu Verkehrserzeugungsmodellen.

### 5.1.3 Zielwahl

Bei der Zielwahl wird der in einer Zelle produzierte Verkehr auf mögliche Zielzellen verteilt. Die Zahl der Ortsveränderungen zwischen zwei Zellen  $o$  und  $d$ , die auf eine Nachfragegruppe  $g$  (z.B. Erwerbstätige zur Arbeit) entfallen, hängt ab

- von den Eigenschaften der Quellzelle (z.B. Zahl der Erwerbstätigen), die das produzierte Verkehrsaufkommen bestimmen,
- von den Eigenschaften der Zielzelle (z.B. Zahl der Arbeitsplätze), die das angezogene Verkehrsaufkommen bestimmen,
- vom Wegezweck (Weg zu einer Pflichtaktivität mit festem Ort oder zu sonstigen Aktivitäten mit freier Wahl des Ortes),
- vom Aufwand, der erforderlich ist, um von der Quelle  $o$  das Ziel  $d$  zu erreichen (z.B. Entfernung, gewichtete Reisezeit der Verkehrsmodi) und
- von der Bewertung des Aufwands durch die Verkehrsteilnehmenden.

Bei der Verteilung der Nachfrage müssen besondere Bedingungen eingehalten werden:

- Bei Pflichtaktivitäten können die Aktivitätenorte (Verkehrszellen) nur von einer fest vorgegebenen Anzahl von Personen aufgesucht werden. Das gilt für Aktivitäten, wie Arbeitsplätze und Ausbildungsplätze, die pro Platz von genau einer Person genutzt werden können. Diese Bedingungen werden als harte (unelastische) Randsummenbedingungen bezeichnet. Die Zielwahl berücksichtigt neben diesen Bedingungen auch die Erreichbarkeit der Aktivitätenorte. Zielwahlmodelle mit harten Randsummenbedingungen halten die in der Verkehrserzeugung ermittelten produzierten und angezogenen Wege (nach durchgeführtem Randsummenausgleich) sowohl auf der Wohnortseite als auch auf der Seite der Pflichtaktivität genau ein.
- Bei den meisten anderen Aktivitäten haben die Aktivitätenorte häufig eine Untergrenze oder Obergrenze an Besuchern. Beispielsweise wird ein vorhandener Einkaufsort auch bei schlechter Erreichbarkeit immer eine Mindestanzahl von Kunden anziehen, ansonsten gäbe es an diesem Ort keine Einkaufsmöglichkeit. Gleichzeitig gibt es eine maximale Anzahl von Kunden, die durch den Einkaufsort bedient werden können. Diese Bedingungen werden als weiche (elastische) Randsummenbedingungen bezeichnet. Die Zielwahl wird von der Erreichbarkeit der Orte und von den vorgegebenen Unter- und Obergrenzen beeinflusst. Weiche Randsummenbedingungen sind für Einkaufsstandorte, Krankenhäuser, Freizeiteinrichtungen mit begrenzter Kapazität sinnvoll.
- Bei Aktivitäten und Aktivitätenorten für die es keine oberen oder unteren Nutzungsgrenzen gibt, wird die Zielwahl in erster Linie von der Erreichbarkeit der Orte beeinflusst. Hier sind auf der Seite des Aktivitätenortes keine besonderen Randsummen einzuhalten. Es wird deshalb von offenen Randsummenbedingungen gesprochen. Sie eignen sich beispielsweise für Freizeitaktivitäten im Grünen.
- Bei Aktivitätsketten, die Pflichtaktivitäten mit festem Ort und Aktivitäten mit freier Ortswahl umfassen, wird die Wahl des freien Ortes von der Lage des Wohn- und Pflichtaktivitätenorts dominiert. Verkehrsteilnehmende bevorzugen Orte, die zwischen Wohnort und Pflichtaktivitätenort liegen (siehe Simon et al. [118]).

In Abbildung 5-4 ist beispielhaft eine mögliche Grundstruktur für ein Zielwahlmodell mit Randsummenbedingungen dargestellt. Die Zahl der Ortsveränderungen wird dabei über eine iterative Anpassung von Lösungsfaktoren ermittelt. Die Methodik und gängige Algorithmen zur Lösung dieses bilinearen Gleichungssystems werden in der Anlage 2.3 genauer vorgestellt.

Daneben kann die Berücksichtigung von Randbedingungen bei der Zielwahl auch durch eine Fixierung des Wahlmodells auf die Randsummen (z.B. produzierte bzw. angezogene Ortsveränderungen) erfolgen. Im Gegensatz zur Verwendung von Randsummenbedingungen ist hier allerdings nur eine einseitige, d.h. entweder quell-, ziel- oder wegezweckseitige Einhaltung der Zahl der Ortsveränderungen möglich. Die einseitigen Randsummen werden bei einer Fixierung direkt eingehalten und ein Gleichungssystem muss entsprechend nicht gelöst werden. In Abbildung 5-4 ist beispielhaft eine mögliche Grundstruktur für ein Zielwahlmodell mit quellseitiger Fixierung dargestellt.

Mögliche Kombinationen beider Ansätze sind in Lohse & Schnabel [111] genauer beschrieben.

<b>Zielwahl</b>	
<b>(Randsummenbedingungen)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl der Ortsveränderungen in Nachfragegruppe <math>g</math> von der Quellzelle <math>o</math> in die Zielzelle <math>d</math></li> </ul>	$d_{god} = \exp(v_{god}) \cdot f_{d_{go}^p} \cdot f_{d_{gd}^a}$
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Randsummenbedingungen</b></li> </ul>	$d_{go}^{p,\min} \leq d_{go}^p = \sum_{d \in Z} d_{god} \leq d_{go}^{p,\max}$ $d_{gd}^{a,\min} \leq d_{gd}^a = \sum_{o \in Z} d_{god} \leq d_{gd}^{a,\max}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzenfunktion</li> </ul>	$v_{god} = \sum_k \beta_{kg}^d \cdot x_{kod}$
<b>Parameter</b>	
$g$	Nachfragegruppe (Wegezzweck x Personengruppe)
$f_{d_{go}^p}, f_{d_{gd}^a}$	Anpassungsfaktoren zur Lösung des bilinearen Gleichungssystems
$\beta_{kg}^d$	<p>Parameter Aufwandsempfindlichkeit der Nachfragegruppe <math>g</math> bei der Zielwahl für die <math>k</math>. Kenngröße der Angebotsqualität.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>abhängig von: Nachfragegruppe</li> <li>Datenquelle Analyse: Parameterschätzungen mit beobachteten Reisezeit- und Reiseweitenverteilungen</li> <li>Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse</li> </ul>
<b>Variablen</b>	
$d_{go}^p, d_{go}^a$	Produzierte und angezogene Ortsveränderungen
$d_{go}^{p,\min}, d_{go}^{p,\max}$ und $d_{gd}^{a,\min}, d_{gd}^{a,\max}$	Minimal und maximal möglicher Wert für produzierte und angezogene Ortsveränderungen. Ergebnisse der Verkehrszeugung (Randsummen)
$x_{kod}$	<p>Wert Kenngröße <math>k</math> zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Zellen <math>o</math> und <math>d</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>typische Kenngrößen: mittlere Zeit über alle Modi (Logsums, siehe Kapitel 5.1.6), Entfernung</li> <li>abhängig von: Verkehrsangebot</li> <li>Datenquelle Analyse: Netzmodell Analysefall</li> <li>Datenquelle Prognose: Netzmodell Bezugsfall</li> </ul>

Abbildung 5-3: Grundstruktur eines Zielwahlmodells mit Randsummenbedingungen basierend auf einem Entscheidungsmodell vom Typ Logit.

<b>Zielwahl (quellseitige Fixierung)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl der Ortsveränderungen der Nachfragegruppe <math>g</math> von der Quellzelle <math>o</math> in die Zielzelle <math>d</math></li> </ul>	$d_{god} = d_{go}^p \frac{d_{gd}^a \cdot \exp(v_{god})}{\sum_{d \in Z} d_{gd}^a \cdot \exp(v_{god})}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzenfunktion</li> </ul>	$v_{god} = \sum_k \beta_{kg}^d \cdot x_{kod}$
<b>Parameter</b>	
$g$	Nachfragegruppe (Wegezzweck x Personengruppe)
$\beta_{kg}^d$	Parameter Aufwandsempfindlichkeit der Nachfragegruppe $g$ bei der Zielwahl für die $k$ . Kenngröße der Angebotsqualität <ul style="list-style-type: none"> <li>abhängig von: Nachfragegruppe</li> <li>Datenquelle Analyse: Parameterschätzungen mit beobachteten Reisezeit- und Reiseweitenverteilungen</li> <li>Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse</li> </ul>
<b>Variablen</b>	
$d_{go}^p, d_{go}^a$	Produzierte und angezogene Ortsveränderungen. Ergebnisse der Verkehrszeugung (Randsummen)
$x_{kod}$	Wert der Kenngröße $k$ zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Zellen $o$ und $d$ <ul style="list-style-type: none"> <li>typische Kenngrößen: mittlere Zeit über alle Modi (Logsums, siehe Kapitel 5.1.6), Entfernung</li> <li>abhängig von: Verkehrsangebot</li> <li>Datenquelle Analyse: Netzmodell Analysefall</li> <li>Datenquelle Prognose: Netzmodell Bezugsfall</li> </ul>

Abbildung 5-4: Grundstruktur eines Zielwahlmodells mit quellseitiger Fixierung (ohne Randsummenbedingungen) basierend auf einem Entscheidungsmodell vom Typ Logit.

### Abbruchkriterium für den Lösungsalgorithmus der Zielwahl mit Randsummenbedingungen

Der Lösungsalgorithmus für die Zielwahl mit Randsummenbedingungen basiert auf einem iterativen Verfahren. Eine festgelegte Anzahl an Iterationen sollte dabei nicht als Abbruchkriterium herangezogen werden. Stattdessen müssen immer so viele Iterationen durchgeführt werden, bis die relativen Abweichungen zwischen den Werten der Randsummen der aktuellen Iteration  $n$  und vorangegangenen Iteration  $n-1$  einen vorgegebenen Grenzwert  $\mathcal{E}$  einhalten.

Für harte sowie elastische Randsummenbedingungen sollte gelten:

$$\frac{|d_{go}^{p,(n)} - d_{go}^{p,(n-1)}|}{d_{go}^{p,(n)}} \leq \mathcal{E}_p \quad \text{und} \quad \frac{|d_{gd}^{a,(n)} - d_{gd}^{a,(n-1)}|}{d_{gd}^{a,(n)}} \leq \mathcal{E}_a$$

wobei

$$\mathcal{E}_p = \frac{1}{g_p \cdot \sqrt{d_{go}^{p,(n)}}} \quad \text{und} \quad \mathcal{E}_a = \frac{1}{g_a \cdot \sqrt{d_{gd}^{a,(n)}}}$$

mit

$g_p$  und  $g_a$  Genauigkeitsfaktoren

$d_{go}^p$  und  $d_{go}^a$  Produzierte und angezogene Ortsveränderungen (Randsummen)

$\varepsilon_p$  und  $\varepsilon_a$  Grenzwerte für die relative Abweichung

Eine Übersicht über eine mögliche Werteskala für Genauigkeitsfaktoren findet sich in Lohse & Schnabel [111].

### **Berücksichtigung von gewachsenen Strukturen in der Zielwahl**

Zielwahlmodelle können die Realität nur vereinfacht abbilden. Gewachsene Strukturen können für Arbeitswege durch die Einbeziehung einer empirischen Matrix (Pendlermatrix, Mobilfunkmatrix) in die Nutzenfunktion berücksichtigt werden. Dazu wird die Nutzenfunktion für jede Relation – meist auf der Ebene von Gemeinden – um eine relationsspezifische Konstante  $\beta_{od}$  erweitert. Sie ergibt sich aus dem Quotienten des beobachteten Anteils  $p_{Soll,od}$  und dem modellierten Anteil  $p_{Ist,od}$  über den in Abbildung 5-5 dargestellten Ansatz. Die relationsspezifische Konstante repräsentiert die gewachsenen Strukturen.

Wird entschieden, dass eine solche Konstante im Analyse- und im Prognosemodell eingeführt wird, beeinflussen die gewachsenen Strukturen auch die zukünftige Zielwahl. Änderungen in den Strukturdaten (Standortänderungen von Arbeitgebern) oder Änderungen in der Verkehrsinfrastruktur (Reisezeitänderungen) haben dann einen geringen Einfluss auf die Zielwahl der Berufspendler. Deshalb sollte eine Matrixanpassung erst dann erfolgen, wenn das Modell so gut wie möglich ohne Anpassungsfaktoren kalibriert wurde. Der Einfluss der Änderungen auf das Ergebnis sollte durch einen Vergleich der Matrix ohne und mit Anpassung dokumentiert werden.

<p>Ermittlung der relationspezifischen Konstante <math>\beta_{od}</math></p>	$\beta_{od} = \ln \left( \frac{p_{Soll,od}}{p_{Ist,od}} \right)$ $p_{Ist,od} = \frac{\exp(v_{od})}{\sum_{o,d} \exp(v_{od})}$ $p_{Ist,od}^* = \frac{\exp \left( v_{od} + \ln \left( \frac{p_{Soll,od}}{p_{Ist,od}} \right) \right)}{\sum_{o,d} \exp \left( v_{od} + \ln \left( \frac{p_{Soll,od}}{p_{Ist,od}} \right) \right)} = \frac{\exp(v_{od} + \beta_{od})}{\sum_{o,d} \exp(v_{od} + \beta_{od})}$
<p><math>p_{Ist,od}</math></p> <p><math>p_{Soll,od}</math></p> <p><math>p_{Ist,od}^*</math></p>	<p>Anteil der Nachfrage, der im Zielwahlmodell auf die Relation von Zelle <math>o</math> nach Zelle <math>d</math> entfällt. Der Anteil ergibt sich aus dem Nutzen <math>v_{od}</math> der Relation.</p> <p>Anteil der Nachfrage, der in der empirischen Nachfragematrix (z.B. Pendlermatrix) auf die Relation von Zelle <math>o</math> nach Zelle <math>d</math> entfällt.</p> <p>Korrigierter Anteil der Nachfrage, der im Zielwahlmodell auf die Relation von Zelle <math>o</math> nach Zelle <math>d</math> entfällt. Durch die relationspezifische Konstante wird sichergestellt, dass <math>p_{Ist,od}^* = p_{Soll,od}</math> gilt.</p>

Abbildung 5-5: Einbeziehung einer empirischen Pendlermatrix in die Nutzenfunktion.

## Hinweise und Empfehlungen zu Zielwahlmodellen

### Hinweise

- Bei der Zielwahl stellt jede Zelle ein mögliches Ziel dar. Die Zahl der Alternativen ist deshalb erheblich größer als bei der Modus- und Routenwahl. Aus diesem Grund sind bei der Zielwahl die größten Ungenauigkeiten zu erwarten.
- Die Attraktivität mancher Verkehrszellen als Quelle oder Ziel wird nicht nur durch die eigenen Eigenschaften (z.B. Anzahl der Arbeitsplätze) bestimmt, sondern unterliegt u.U. zusätzlich dem Einfluss regionaler Besonderheiten, wie z.B. dem inhärenten Nutzen einer Innenstadtlage. Im Rahmen der Zielwahl können derartige Einflüsse durch den Einbezug der Eigenschaften von umliegenden Verkehrszellen in die Bewertung (als Gewicht) der betrachteten Verkehrszelle abgebildet werden.
- Wenn mehrere Personengruppen die gleichen Aktivitätenorte (z.B. Erwerbstätige mit und ohne Pkw zur Arbeit) aufsuchen, dann müssen die Aktivitätenorte auf geeignete Weise den Personengruppen zugeordnet werden. Hierzu eignen sich personengruppenübergreifende Randsummenbedingungen.
- Zielwahlmodelle können die Realität nur vereinfacht abbilden. Gewachsene Strukturen können für Arbeitswege durch die Einbeziehung empirischer Matrizen (z.B. Pendlermatrix) - wie in Abbildung 5-5 dargestellt - in der Nutzenfunktion berücksichtigt werden. Eine Modellanpassung sollte erst dann erfolgen, wenn das Modell so gut wie möglich ohne Anpassungsfaktoren kalibriert wurde. Die Anpassungsfaktoren müssen dann im Analyse- und im Prognosemodell genutzt werden. Eine Modellanpassung erfordert eine sorgfältige Prüfung der Korrekturwirkungen.
- Verwaltungsgrenzen können die Zielwahl im Ausbildungsverkehr einschränken, Landesgrenzen die Zielwahl für Arbeits- und Versorgungswege beeinflussen. Das kann im Modell durch relationsspezifische Zuschläge bei den Aufwänden berücksichtigt werden.
- Harte Randsummenbedingungen erfordern eine sorgfältige Überprüfung der Siedlungsstrukturdaten, da in diesem Fall die Siedlungsstrukturdaten einen großen Einfluss auf die Zielwahl haben. Im Prognosefall muss für jede Strukturgröße geprüft werden, ob eine Änderung der Einwohnerzahl eine Änderung bei den Strukturgrößen (z.B. Schulplätze) erfordert.

### Modellparameter

- Für jede Nachfragegruppe müssen die Nutzenfunktionen so spezifiziert und die Modellparameter so geschätzt werden, dass modellierte und gemessene Reiseweiten- und Reisezeitverteilungen übereinstimmen. Tabelle 8-8 gibt Hinweise zum Vergleich von modellierten und gemessenen Verteilungen.

### Empfehlungen

- Für die Wegezwecke der Pflichtaktivitäten (z.B. Arbeiten, Ausbildung) sind Zielwahlmodelle erforderlich, die harte Randsummenbedingungen einhalten.
- Der Aufwand muss mindestens die Reisezeit berücksichtigen. Bei sequentiellen Modellen sollte die mittlere Reisezeit der modellierten Modi, gewichtet mit deren relationsspezifischen Modal-Split-Anteilen herangezogen werden.
- Modelle mit simultaner Ziel- und Moduswahl sind einfachen Zielwahlmodellen vorzuziehen, da so der Aufwand aller Verkehrsmodi (Reisezeit Pkw, ÖV usw.) berücksichtigt werden kann.

### Optional

- Pendlerkorrektur entsprechend Abbildung 5-5 und Übernahme der Korrekturfaktoren in die Prognose. In diesem Fall sollte nachgewiesen werden, wie groß der Einfluss der Pendlerkorrektur ist. Dazu können Gütemaße aus Tabelle 8-2 zum Vergleich von zwei Matrizen herangezogen werden. Große Abweichungen müssen erklärt werden. Erklärungen können die besondere Attraktivität eines Arbeitgebers oder gewachsene Strukturen (ehemalige Grenzen, kulturelle und sprachliche Grenzen, frühere Unternehmensstandorte) sein. Große Abweichungen sollten möglichst außerhalb der Pendlerkorrektur explizit behandelt werden, um einen adäquateren Übertrag der Faktoren in die Prognose zu erreichen.

Tabelle 5-3: Hinweise und Empfehlungen zu Zielwahlmodellen.

### 5.1.4 Moduswahl

Ein Modus umfasst die Menge der Verkehrsmittel, die Verkehrsteilnehmende für eine Ortsveränderung benötigen. Ein Moduswahlmodell verteilt die Verkehrsnachfrage einer Relation auf die verfügbaren Modi (z.B. Fuß, Rad, ÖV, Pkw). Bei Modi, die mehrere Verkehrsmittel umfassen, erfolgt die Aufteilung auf einzelnen Verkehrsmittel (z.B. Bus und Bahn) in einer eigenen Stufe. Diese Aufteilung, die man als Verkehrsmittelwahl oder als Sub-Mode Choice bezeichnen kann, erfolgt häufig bei der Routenwahl. Hier wird festgelegt, welcher Anteil eines Weges auf ein Verkehrsmittel entfällt.

Die Moduswahl wird von Eigenschaften des Verkehrsteilnehmenden, des Modus und der Ortsveränderung beeinflusst, die auf geeignete Weise in das Verkehrsnachfragemodell integriert werden müssen:

Eigenschaften des Verkehrsteilnehmenden:

- Lage des Wohnorts:  
Die Lage des Wohnorts kann die Notwendigkeit des Pkw-Besitzes beeinflussen. An Orten mit schlechter ÖV-Qualität kann der Motorisierungsgrad höher sein. Diese Eigenschaft kann durch ein vorgeschaltetes Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodell abgebildet werden oder vereinfacht durch ein zellenspezifisches Attribut, das die ÖV-Qualitätsstufe beschreibt.
- Pkw-Verfügbarkeit, Führerscheinbesitz und Zeitkarten-Verfügbarkeit:  
Diese Eigenschaften können über Personengruppen oder über Verkehrszellenattribute (Anteil der Personen mit Pkw-Verfügbarkeit bzw. Zeitkartenverfügbarkeit) abgebildet werden.
- Haushaltsstruktur:  
Eigenschaften der Haushaltsstruktur (z.B. Pkw-Verfügbarkeit) können nur sehr vereinfacht über Personengruppen abgebildet werden.

Eigenschaften der Verkehrsmittel des Modus:

- Zeitaufwand (Zu- und Abgangszeit, Wartezeiten, Fahrtzeiten) und Umsteigehäufigkeiten:  
Diese Eigenschaften können direkt mit einem Verkehrsnachfragemodell berechnet und in die Nutzenfunktion integriert werden.
- Kosten (Fahrpreise, Kraftstoffkosten, Straßen- und Parkplatznutzungsgebühren):  
Kosten, die nicht entfernungsabhängig sind, erfordern ein Kostenberechnungsmodell. Die damit ermittelten Kosten können dann in die Nutzenfunktion integriert werden. Parkplatznutzungsgebühren hängen von der Parkdauer ab und müssen deshalb nach Wegezweck differenziert werden.
- Zeitliche Verfügbarkeit (Bedienungshäufigkeit):  
Aus der Bedienungshäufigkeit kann eine fiktive Wartezeit am Startort und eine Startwartezeit an der Starthaltestelle abgeleitet und in die Nutzenfunktion integriert werden. Die fiktive Wartezeit beschreibt die Zeitdifferenz zwischen der Wunschabfahrtszeit des Fahrgastes und der angebotenen Abfahrtszeit. Sie kann als Anpassungszeit bezeichnet werden. Aus der Bedienungshäufigkeit kann außerdem eine Startwartezeit abgeleitet werden. Sie beschreibt den Zeitpuffer, den ein Fahrgast für die Ankunft an der Starthaltestelle einplant.
- Parkplatzverfügbarkeit:  
Die Parkplatzverfügbarkeit kann über ein Verkehrszellenattribut abgebildet werden.
- Komfort, Bequemlichkeit, Sicherheit:  
Diese Eigenschaften werden üblicherweise nicht explizit modelliert und gehen über eine modusspezifische Konstante in die Nutzenfunktion ein. Der unterschiedliche Komfort eines modernen Schienenverkehrsmittels gegenüber einem Bus kann durch eine unterschiedliche Bewertung der Fahrtzeit erfolgen (Schienenbonus).
- Regelmäßigkeit und Zuverlässigkeit des Verkehrsangebots:  
Die Regelmäßigkeit und die Zuverlässigkeit des Verkehrsangebots werden bisher nicht in Modellen abgebildet. Sie gehen im Pkw-Verkehr indirekt durch die Fahrtzeit im belasteten Netz ein, die auf Relationen mit hoher Auslastung (= geringere Zuverlässigkeit) stärker steigt als auf Relationen mit geringer Auslastung.

Eigenschaften der Ortsveränderungen:

- Wegezweck, da man bei regelmäßigen Wegezwecken bessere Kenntnisse über das Verkehrsangebot hat,
- Zeitpunkt der Fahrt, da z.B. in den Abendstunden das ÖV-Angebot schlechter sein kann.

<p><b>Moduswahl</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahl der Ortsveränderungen in Nachfragegruppe <math>g</math> von der Quellzelle <math>o</math> in die Zielzelle <math>d</math> mit dem Modus <math>m</math></li> </ul>		$d_{godm} = d_{god} \cdot \frac{\exp(v_{godm})}{\sum_{m \in M} \exp(v_{godm})}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzenfunktion</li> </ul>		$v_{godm} = \beta_{0mg}^m + \sum_k \beta_{kmg}^m \cdot x_{kodm}$
<p><b>Parameter</b></p>		
$g$	Nachfragegruppe (Wegezweck x Personengruppe)	
$\beta_{0mg}^m$	moduspezifische Konstante	
$\beta_{kmg}^m$	Parameter für die Kenngröße $k$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• abhängig von: Nachfragegruppe <math>g</math> und vom Modus <math>m</math></li> <li>• Datenquelle Analyse: Parameterschätzungen auf Basis von beobachteten (RP) oder hypothetischen Moduswahlentscheidungen (SP), oder Übernahme aus anderen Verkehrsnachfragemodellen</li> <li>• Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse</li> </ul>	
<p><b>Variablen</b></p>		
$d_{god}$	Zahl der Ortsveränderungen von $o$ nach $d$ . Ergebnisse der Zielwahl	
	Wert der Kenngröße $k$ zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Zellen $o$ und $d$ mit dem Modus $m$	
$x_{kodm}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• typische Kenngrößen: Fahrzeit, Zu- und Abgangszeit, Wartezeiten, Umsteigehäufigkeit, Kosten</li> <li>• abhängig von: Verkehrsangebot</li> <li>• Datenquelle Analyse: Netzmodell Analysefall</li> <li>• Datenquelle Prognose: Netzmodell Bezugsfall</li> </ul>	

Abbildung 5-6: Grundstruktur eines Moduswahlmodells basierend auf einem Entscheidungsmodell vom Typ Logit.

### Kopplung von Routenwahl und Moduswahl

So wie die Angebotsqualität aller Modi die Erreichbarkeit eines Zieles bestimmt und damit die Zielwahl beeinflusst (siehe Kapitel 5.1.6), wirken die Qualität der Routen auf die Angebotsqualität eines Modus. Bei der Routenwahl wählen die Verkehrsteilnehmenden eine Alternative (Route oder Verbindung) eines Modus. Die Menge aller Alternativen definiert dann die Qualität des Modus und beeinflusst so die Moduswahl. Um die Qualität einer Menge von Alternativen zu beschreiben, gibt es grundsätzlich zwei Ansätze:

1. Ermittlung mittlerer Kenngrößen: Die mittlere Kenngröße eines Modus  $m$  ergibt sich aus den Kenngrößen der Alternativen  $i$ , die mit dem Anteil  $p$  der Alternative gewichtet werden.

$$x_m = \sum_{i \in m} x_{m,i} \cdot p_{m,i}$$

2. Ermittlung der Nutzensumme: Der Nutzen eines Modus  $m$  ergibt sich aus der Summe der bewerteten Nutzen aller Alternativen  $i$ . Die Summe wird dann – bei Anwendung eines Logit-Modells – logarithmiert. Durch diese Umkehrfunktion wird der bewertete Nutzen wieder in einen unbewerteten Nutzen des gesamten Modus transformiert. Dieser Wert wird als LogSum (oder Log-Summe) bezeichnet (De Jong et al. [30]):

$$v_m = \ln \left( \sum_{i \in m} e^{\alpha \cdot v_{m,i}} \right)$$

Der erste Ansatz kann insbesondere im Modus ÖV zu inkonsistenten Ergebnissen führen, da sich die Kenngrößen von Alternativen im ÖV stark unterscheiden können. Die Problematik lässt sich am ÖV-Angebot einer Relation erläutern (siehe Abbildung 5-7). Im Ist-Zustand wird einmal stündlich eine ÖV-Verbindung angeboten, die eine Reisezeit von 25 Minuten aufweist. Wir nun eine zusätzliche Verbindung eingeführt, die das Angebot verdichtet, aber eine Reisezeit von 30 Minuten erfordert, erhöht sich die mittlere Reisezeit. Sofern das Moduswahlmodell nur die Reisezeit berücksichtigt, sinkt der Anteil des ÖV bei der Verkehrsmittelwahl. Das ist nicht realistisch. Da Fahrgäste, die die langsamere Verbindung wählen offensichtlich einen gewissen Nutzen haben, ist es besser die Nutzenwerte der Alternativen aufzusummieren als den Mittelwert zu bilden. Anders als bei der simultanen Ziel- und Moduswahl (siehe Kapitel 5.1.6) ist die Nutzung von LogSums bei der Kopplung von Routenwahl und Moduswahl bisher noch nicht Stand der Technik. Das führt in folgenden Fällen immer wieder zu Problemen:

- Ein ÖV-Angebot wird durch ein zusätzliches Fahrtenangebot ergänzt, das zwar die Bedienungshäufigkeit verbessert, aber einen höheren Zeitaufwand erfordert.
- Bei der Routenwahl werden in der Nutzenfunktion andere Variablen genutzt als in der Moduswahl.

Für Ortsveränderungen zwischen zwei Verkehrszellen stehen im Ist-Zustand zwei Alternativen (Routen) zur Verfügung:

- Eine Route mit dem Pkw: Sie erfordert eine Reisezeit von 20 Minuten
- Eine Route mit Buslinie B1: Sie erfordert eine Reisezeit von 25 Minuten

Im Plan-Zustand soll die Buslinie B1 durch eine zweite Buslinie B2 verstärkt werden, die aber 30 Minuten benötigt.

Es soll der Modal-Split Pkw und ÖV mit einem Logit-Modell ermittelt werden. Folgende Nutzenfunktionen sind gegeben:

$$v_{Pkw} = \beta_{Pkw} + \beta_t \cdot t_{Pkw} = 1 - 0,1 \cdot t_{Pkw}$$

$$v_{\ddot{O}V} = \beta_t \cdot t_{\ddot{O}V} = -0,1 \cdot t_{\ddot{O}V}$$

Damit ergibt sich für jede Alternative der folgende Nutzen:

$$v_{Pkw} = 1 - 0,1 \cdot 20 = -1,0 \quad \Rightarrow \exp(v_{Pkw}) = 0,368$$

$$v_{B1} = -0,1 \cdot 25 = -2,5 \quad \Rightarrow \exp(v_{B1}) = 0,082$$

$$v_{B2} = -0,1 \cdot 30 = -3,0 \quad \Rightarrow \exp(v_{B2}) = 0,050$$

#### Modal Split im Ist-Zustand

$$p_{Pkw} = \frac{e^{v_{Pkw}}}{e^{v_{Pkw}} + e^{v_{\ddot{O}V}}} = \frac{0,368}{0,368 + 0,082} = \frac{0,368}{0,450} = 0,818$$

$$p_{\ddot{O}V} = \frac{e^{v_{\ddot{O}V}}}{e^{v_{Pkw}} + e^{v_{\ddot{O}V}}} = \frac{0,082}{0,368 + 0,082} = \frac{0,082}{0,450} = 0,182$$

#### Modal Split im Plan-Zustand – Lösung über mittlere Reisezeit

Schritt 1: Ermittle Aufteilung auf B1 und B2

$$p_{B1} = \frac{e^{v_{B1}}}{e^{v_{B1}} + e^{v_{B2}}} = \frac{0,082}{0,082 + 0,050} = \frac{0,082}{0,132} = 0,622$$

$$p_{B2} = \frac{e^{v_{B2}}}{e^{v_{B1}} + e^{v_{B2}}} = \frac{0,050}{0,082 + 0,050} = \frac{0,050}{0,132} = 0,378$$

$$t_{\ddot{O}V} = p_{B1} \cdot t_{B1} + p_{B2} \cdot t_{B2} = 0,622 \cdot 25 + 0,378 \cdot 30 = 26,9$$

Schritt 2: Berechne Modal Split Pkw und ÖV

$$v_{\ddot{O}V} = -0,1 \cdot 26,9 = -2,69 \quad \Rightarrow \exp(v_{\ddot{O}V}) = 0,068$$

$$p_{Pkw} = \frac{e^{v_{Pkw}}}{e^{v_{Pkw}} + e^{v_{\ddot{O}V}}} = \frac{0,368}{0,368 + 0,068} = \frac{0,368}{0,436} = 0,844$$

$$p_{\ddot{O}V} = \frac{e^{v_{\ddot{O}V}}}{e^{v_{Pkw}} + e^{v_{\ddot{O}V}}} = \frac{0,068}{0,368 + 0,068} = \frac{0,068}{0,436} = 0,156$$

Ergebnis: Die Verbesserung des ÖV-Angebots reduziert den ÖV-Anteil. Das ist nicht realistisch.

#### Modal Split im Plan-Zustand – Lösung über die ÖV-Nutzensumme LogSums

Anstelle der mittleren ÖV-Reisezeit wird die Nutzensumme der Alternativen B1 und B2 herangezogen.

$$\exp(v_{\ddot{O}V}) = \exp(v_{B1}) + \exp(v_{B2}) = 0,082 + 0,050 = 0,132$$

$$p_{Pkw} = \frac{e^{v_{Pkw}}}{e^{v_{Pkw}} + e^{v_{\ddot{O}V}}} = \frac{0,368}{0,368 + 0,132} = \frac{0,368}{0,500} = 0,736$$

$$p_{\ddot{O}V} = \frac{e^{v_{\ddot{O}V}}}{e^{v_{Pkw}} + e^{v_{\ddot{O}V}}} = \frac{0,132}{0,368 + 0,132} = \frac{0,132}{0,500} = 0,264$$

Ergebnis: Die Verbesserung des ÖV-Angebots erhöht den ÖV-Anteil, da auch die schlechtere Verbindung einen kleinen zusätzlichen Nutzen bringt.

Abbildung 5-7: Vergleich eines beispielhaften Entscheidungsmodells mit mittleren Kenngrößen und LogSums.

## Hinweise und Empfehlungen zu Moduswahlmodellen

<p><b>Allgemein</b></p> <p><u>Hinweise</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entfernungsabhängige Verkehrsmittelleignung: ÖV kann häufig für kurze Wege nicht sinnvoll genutzt werden. Das kann über eine nichtlineare, entfernungsabhängige Nutzenkomponente berücksichtigt werden, z.B. mit einer logarithmischen Bewertung der Fahrzeit oder der Luftlinienweite.</li> <li>• Besetzungsgrad: Der Besetzungsgrad kann durch einen eigenständigen Modus Pkw-Mitfahrer abgebildet werden.</li> <li>• Bedienungshäufigkeit: Der Einfluss der Bedienungshäufigkeit kann über die Startwartezeit (z.B. halbe Fahrzeugfolgezeit) oder über die Anpassungszeit (Differenz zwischen Wunschabfahrtszeit und verfügbarer Abfahrtszeit) in die Moduswahl eingehen.</li> <li>• Umsteighäufigkeit: Kann verwendet werden, um Abschlüge bezüglich Komfort und Zuverlässigkeit im ÖV abzubilden.</li> <li>• Ein ÖV-Angebot, das Verbindungen mit unterschiedlichen Qualitäten umfasst, kann zu unrealistischen Ergebnissen bei der Moduswahl führen, wenn die Nutzenfunktion der Moduswahl vor allem die Reisezeit umfasst und die Dichte des ÖV-Angebots nicht oder nur in kleinem Umfang in die Nutzenfunktion eingeht.</li> <li>• Die Fahrzeit ausgewählter Verkehrsmittel des ÖV kann durch einen Komfortfaktor (Schienenbonus) reduziert werden. Dieser Ansatz sollte nur dann gewählt werden, wenn sich so die tatsächliche Routenwahl und Moduswahl besser abbilden lässt.</li> </ul> <p><u>Modellparameter</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Modellparameter müssen für jede Nachfragegruppe so geschätzt werden, dass modellierte und gemessene Modusanteile übereinstimmen. Hierfür kommt in der Regel die Maximum-Likelihood Methode zum Einsatz.</li> <li>• Wichtige Parameter der Nutzenfunktion können mit Daten aus Haushaltsbefragungen mit Wegetagebüchern oder mit den Daten nationaler Mobilitätsbefragungen (Mobilität in Deutschland (MiD, [91]), Mobilität in Städten (SrV, [124]), Deutsches Mobilitätspanel (MOP, [80])) geschätzt werden.</li> <li>• Kosten werden vom Nutzer unterschiedlich bewertet und haben deshalb unterschiedliche Wirkungen auf die Modus- und Routenwahl. Die Zahlungsbereitschaft für Reisezeiteinsparungen kann außerdem mit der Reiseweite zunehmen, siehe diverse Studien zu Zeitkosten (z.B. Weis et al. [135] oder Axhausen et al. [3]).</li> </ul>
<p><b>Städtische / regionale Modelle</b></p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Attribute der Nutzenfunktion: Fahrzeit im Verkehrsmittel, Zu- und Abgangszeit, Umsteigewartezeit, Bedienungshäufigkeit / Startwartezeit / Anpassungszeit, Umsteighäufigkeit.</li> <li>• Verkehrsmittelverfügbarkeit: Verfügbarkeit von ÖV-Zeitkarten und Pkw als Teil der Nutzenfunktion oder über Personengruppen.</li> <li>• Die Attribute der Nutzenfunktion der Routenwahl sollen nach Möglichkeit in die Nutzenfunktion der Moduswahl übernommen werden.</li> </ul> <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Attribute der Nutzenfunktion: Reisekosten (Fahrpreise, Kraftstoffkosten, Straßen- und Parkplatznutzungsgebühren), Parksuchzeit.</li> <li>• Ein Schienenbonus, der als Komfortfaktor multiplikativ mit der Fahrzeit der Schienenverkehrsmittel verknüpft wird und auch in der ÖV-Umlegung genutzt wird.</li> <li>• Anstelle von mittleren Kenngrößen das Konzept der LogSums nutzen. Hierzu gibt es bei der Kopplung von Routenwahl und Moduswahl bisher aber nur wenig Erfahrung.</li> </ul>
<p><b>Großräumige / teilnationale Modelle</b></p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Attribute der Nutzenfunktion: Reisezeit, Bedienungshäufigkeit / Startwartezeit / Anpassungszeit, Umsteighäufigkeit.</li> <li>• Verkehrsmittelverfügbarkeit: Verfügbarkeit von ÖV-Zeitkarten und Pkw als Teil der Nutzenfunktion oder über Personengruppen.</li> <li>• Die Attribute der Nutzenfunktion der Routenwahl sollen nach Möglichkeit in die Nutzenfunktion der Moduswahl übernommen werden.</li> </ul> <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Attribute der Nutzenfunktion: Reisekosten (Fahrpreise, Kraftstoffkosten, Straßen- und Parkplatznutzungsgebühren), Parksuchzeit, Zu- und Abgangszeit.</li> </ul>

Tabelle 5-4: Hinweise und Empfehlungen zu Moduswahlmodellen.

### 5.1.5 Simultane Aktivitäten- und Moduswahl

Modelle mit einer simultanen Aktivitäten- und Moduswahl stellen eine Vereinfachung der tatsächlichen Wahlentscheidungen dar. Grundlage der Modellierung ist die Annahme, dass sich das modusfeine Verkehrsaufkommen ausschließlich aus dem Raumtyp erklären lässt. Für den Pkw-Verkehr wird dabei beispielsweise angenommen, dass Menschen mit zunehmendem Wohlstand Autos erwerben und diese

dann auch vorrangig nutzen. Damit ist die Pkw-Verfügbarkeit das maßgebende Kriterium für die Moduswahl, so dass die Moduswahl direkt bei der Verkehrserzeugung bestimmt werden kann. Für den ÖV wiederum kann u.U. die Annahme getroffen werden, dass beispielsweise der Besitz einer ÖV-Jahreskarte das maßgebende Kriterium für die Moduswahl darstellt. Modelle, die auf diesem Ansatz beruhen, werden Trip-End-Modelle genannt. Für Prognosen sind Trip-End-Modelle dann hinreichend genau, wenn zwei Anforderungen erfüllt sind:

- Das ÖV-Angebot im Untersuchungsraum ist auf allen Relationen von vergleichbarer Qualität, d.h. es gibt nicht einzelne Relationen mit deutlich besserer oder schlechterer Qualität.
- Änderungen der Reisezeit durch neue Verkehrsangebote oder Nachfrageänderungen sind gering.

Grundsätzlich eignen sich Trip-End-Modelle nur für eine nachfrageorientierte Planung im motorisierten Individualverkehr. Sie prognostizieren die zukünftige Pkw-Nachfrage aufgrund erhöhter Pkw-Verfügbarkeit, reagieren aber nicht auf Maßnahmen, die das ÖV-Angebot verbessern oder Straßenbenutzungsgebühren vorsehen. Trip-End-Modelle finden sich beispielsweise in nationalen Modelle mit nur einem oder zwei Modi (Pkw, ÖV).

### Hinweise und Empfehlungen zur simultanen Aktivitäten- und Moduswahl

#### Hinweise

- Allgemein geringerer Datenaufwand als bei einer sequentiellen Modellierung, da keine Verhaltensparameter für die Moduswahl und Daten über die Eigenschaften der Verkehrsmittel notwendig sind.
- Beschaffung der spezifischen Modal-Splits als notwendige Datengrundlage allerdings oft problematisch.
- Unter Umständen reduzierte Aussagekraft des Modells, da die Abbildung einer Moduswahlreaktion auf ein verbessertes Angebot nicht möglich ist.

#### Empfehlungen

- In regionalen Personenverkehrsmodellen sollten Trip-End-Ansätze nicht genutzt werden, wenn hier die Wechselwirkungen zwischen Pkw und ÖV groß sind. Das trifft insbesondere auf Großstädte und Metropolregionen zu.
- In großräumigen Personenverkehrsmodellen sind Trip-End-Ansätze in Ausnahmefällen einsetzbar, z.B. bei Voruntersuchungen oder bei sektoralen Planungsaufgaben.
- In regionalen Wirtschaftsverkehrsmodellen sind Trip-End-Ansätze angemessen, da hier der Straßenverkehr dominiert.

Tabelle 5-5: Hinweise und Empfehlungen zur simultanen Aktivitäten- und Moduswahl.

### 5.1.6 Simultane Ziel- und Moduswahl

Modelle mit simultaner Ziel- und Moduswahl basieren auf der Annahme, dass Ziel- und Moduswahlentscheidungen nicht eigenständig, sondern in Abhängigkeit voneinander getroffen werden. In diesem Zusammenhang lässt sich zwischen hierarchisch simultanen und vollständig simultanen Modellen unterscheiden, die jeweils unterschiedliche Annahmen bezüglich der Ausprägung dieser Abhängigkeiten treffen.

Ein bekanntes hierarchisch simultanes Modell ist Nested-Logit. Es nimmt an, dass sich die Entscheidungsebenen der Ziel- und Moduswahl zwar beeinflussen, aber dabei hierarchisch gegliedert bleiben und nicht vollständig zusammenfallen. Es basiert auf dem Konzept der LogSum (Log-Summe) (De Jong et al. [30]). Hintergrund ist, dass Verkehrsteilnehmenden häufig mehrere Verkehrsmodi zur Verfügung stehen, mit denen das Ziel erreicht werden kann. Deshalb sollte der Aufwand zum Erreichen eines Zieles die Angebotsqualität aller Modi berücksichtigen. Ein Ziel ist dann umso besser erreichbar und hat damit einen hohen Nutzen, wenn es mit mehreren Modi erreicht werden kann. Die LogSum ist

nun die logarithmierte Summe des Nutzens über alle Verkehrsmittel für ein Ziel und geht im Fall von Nested-Logit als Aufwand in die Zielwahl ein. Der Einfluss der LogSum und damit der Moduswahl auf die Zielwahl muss über einen Nest-Parameter  $0 \leq \alpha_{go} \leq 1$  reguliert werden. Ein größerer Nest-Parameter erhöht dabei den Einfluss der Moduswahl auf die Zielwahl. Die Moduswahl wird bei Nested-Logit über ein Logit-Entscheidungsmodell abgebildet.

Es existieren zwei Spezialfälle, die nicht mehr Teil des eigentlichen Nested-Logit-Ansatzes sind, aber dessen Übergang in anderen Ziel- und Moduswahlmodelle verdeutlichen. Der erste Fall setzt den Nest-Parameter  $\alpha_{go} = 0$ , womit die LogSum und damit die Moduswahl keinen Einfluss mehr auf die Zielwahl besitzen. Damit erfolgen die Wahlentscheidungen sequentiell. In der dargestellten Nested-Logit-Variante mit Gewichtung und quellseitiger Fixierung (siehe Abbildung 5-8) führt dies zu einer Zielwahl auf Basis der zielseitigen Randsummen. Die Moduswahl wird weiterhin über das Logit-Entscheidungsmodell berechnet. Für den zweiten Spezialfall gilt  $\alpha_{go} = 1$ , wodurch die LogSum und damit die Moduswahl vollen Einfluss auf die Zielwahl nehmen. Dieser Fall entspricht einem vollständig simultanen Ziel- und Moduswahlmodell mit Fixierung (quellseitige Fixierung in der Variante in Abbildung 5-8) und ohne gleichzeitige quell- und zielseitige Randsummenbedingungen. Ein vollständig simultanes Ziel- und Moduswahlmodell verzichtet auf eine Hierarchie der Entscheidungsebenen.

Ein weiterer vollständig simultaner Ansatz basiert auf einem trilinearen Gleichungssystem (siehe Abbildung 5-9), das in Lohse & Schnabel [111] beschrieben ist und vom bilinearen Gleichungssystem der Zielwahl abgeleitet wird. Es bietet die Möglichkeit, zusätzlich zu den quell- und zielseitigen Randsummenbedingungen mit Zielwahlbezug, eine Randsummenbedingung mit Bezug zur Moduswahl vorzugeben.

Eine Kombination von Ziel- und Moduswahl lässt sich auch durch die Vorgabe einer weiteren harten Randbedingung erreichen. Diese unelastische Randbedingung  $d_{gm}^1$  fordert, dass der Anteil jedes Modus im gesamten Untersuchungsraum dem beobachteten Anteil entsprechen muss und wird demnach aus dem Produkt von Anteil je Modus und der Gesamtanzahl an Ortsveränderungen für eine Nachfragegruppe gebildet. [39; 111]

<b>Simultane Ziel- und Moduswahl (hierarchisch, Nested-Logit)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl der Ortsveränderungen in Nachfragegruppe <math>g</math> von der Quellzelle <math>o</math> in die Zielzelle <math>d</math> mit dem Modus <math>m</math></li> </ul>	$d_{godm} = d_{go}^p \frac{\exp(v_{godm})}{\sum_{m \in M} \exp(v_{godm})} \frac{d_{gd}^a \cdot \exp\left(\alpha_{go} \ln \sum_{m \in M} \exp(v_{godm})\right)}{\sum_{d \in Z} \left[ d_{gd}^a \cdot \exp\left(\alpha_{go} \ln \sum_{m \in M} \exp(v_{godm})\right) \right]}$ $= d_{go}^p \frac{\exp(v_{godm})}{\sum_{m \in M} \exp(v_{godm})} \frac{d_{gd}^a \cdot \left[ \sum_{m \in M} \exp(v_{godm}) \right]^{\alpha_{go}}}{\sum_{d \in Z} \left[ d_{gd}^a \cdot \left[ \sum_{m \in M} \exp(v_{godm}) \right]^{\alpha_{go}} \right]}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzenfunktion</li> </ul>	$v_{godm} = \beta_{0mg}^m + \sum_k \beta_{kmg}^m \cdot x_{kodm}$
<b>Parameter</b>	
$g$	Nachfragegruppe (Wegezweck, Personengruppe)
$\alpha_{go}$	Nest-Parameter der Nachfragegruppe $g$ in Quellzelle $o$
$\beta_{0mg}^m$	modusspezifische Konstante
$\beta_{kmg}^m$	Parameter Aufwandsempfindlichkeit der Nachfragegruppe $g$ bei der Ziel- und Moduswahl für die $k$ . Kenngröße der Angebotsqualität. <ul style="list-style-type: none"> <li>abhängig von: Nachfragegruppe <math>g</math> und vom Modus <math>m</math></li> <li>Datenquelle Analyse: Parameterschätzungen mit beobachteten Moduswahlentscheidungen</li> <li>Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse</li> </ul>
<b>Variablen</b>	
$d_{go}^p, d_{go}^a$	Produzierte und angezogene Ortsveränderungen. Ergebnisse der Verkehrszeugung (Randsummen)  Wert Kenngröße $k$ zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Zellen $o$ und $d$ mit dem Modus $m$
$x_{kodm}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>typische Kenngrößen: Fahrtzeit, Zu- und Abgangszeit, Wartezeiten, Umsteigehäufigkeit, Kosten</li> <li>abhängig von: Verkehrsangebot</li> <li>Datenquelle Analyse: Netzmodell Analysefall</li> <li>Datenquelle Prognose: Netzmodell Bezugsfall</li> </ul>

Abbildung 5-8: Grundstruktur eines hierarchisch simultanen Ziel- und Moduswahlmodells vom Typ Nested-Logit mit Gewichtung und quellseitiger Fixierung.

<p><b>Simultane Ziel- und Moduswahl</b> (vollständig, Randsummenbedingungen)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Zahl der Ortsveränderungen in Nachfragegruppe <math>g</math> von der Quellzelle <math>o</math> in die Zielzelle <math>d</math> mit dem Modus <math>m</math></li> </ul>	$d_{godm} = \exp(v_{godm}) \cdot f_{d_{go}^p} \cdot f_{d_{gd}^a} \cdot f_{d_{gm}}$
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Randsummenbedingungen</b></li> </ul>	$d_{go}^{p,\min} \leq d_{go}^p = \sum_{d \in Z} \sum_{m \in M} d_{godm} \leq d_{go}^{p,\max}$ $d_{gd}^{a,\min} \leq d_{gd}^a = \sum_{o \in Z} \sum_{m \in M} d_{godm} \leq d_{gd}^{a,\max}$
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Randsummenbedingung Moduswahl</b> (unelastisch)</li> <li>Nutzenfunktion</li> </ul>	$d_{gm} = \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{godm}$ $v_{godm} = \beta_{0mg}^m + \sum_k \beta_{kmg}^m \cdot x_{kodm}$
<p><b>Parameter</b></p> <p><math>g</math> Nachfragegruppe (Wegezzweck x Personengruppe)</p> <p><math>f_{d_{go}^p}, f_{d_{gd}^a}, f_{d_{gm}}</math> Anpassungsfaktoren zur Lösung des trilinearen Gleichungssystems</p> <p><math>\beta_{0mg}^m</math> modusspezifische Konstante</p> <p><math>\beta_{kmg}^m</math> Parameter Aufwandsempfindlichkeit der Nachfragegruppe <math>g</math> bei der Ziel- und Moduswahl für die <math>k</math>. Kenngröße der Angebotsqualität.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>abhängig von: Nachfragegruppe <math>g</math> und vom Modus <math>m</math></li> <li>Datenquelle Analyse: Parameterschätzungen mit beobachteten Moduswahlentscheidungen</li> <li>Datenquelle Prognose: unverändert aus Analyse</li> </ul>	
<p><b>Variablen</b></p> <p><math>d_{go}^p, d_{go}^a</math> Produzierte und angezogene Ortsveränderungen</p> <p><math>d_{go}^{p,\min}, d_{go}^{p,\max}</math> und <math>d_{gd}^{a,\min}, d_{gd}^{a,\max}</math> Minimal und maximal möglicher Wert für produzierte und angezogene Ortsveränderungen. Ergebnisse der Verkehrszeugung (Randsummen)</p> <p><math>d_{gm}</math> Zahl der Ortsveränderungen in Nachfragegruppe <math>g</math> mit dem Modus <math>m</math></p> <p>Wert Kenngröße <math>k</math> zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Zellen <math>o</math> und <math>d</math> mit dem Modus <math>m</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>typische Kenngrößen: Fahrzeit, Zu- und Abgangszeit, Wartezeiten, Umsteigehäufigkeit, Kosten</li> <li>abhängig von: Verkehrsangebot</li> <li>Datenquelle Analyse: Netzmodell Analysefall</li> <li>Datenquelle Prognose: Netzmodell Bezugsfall</li> </ul> <p><math>x_{kodm}</math></p>	

Abbildung 5-9: Grundstruktur eines vollständig simultanen Ziel- und Moduswahlmodells mit Randsummenbedingungen basierend auf einem Entscheidungsmodell vom Typ Logit.

## Hinweise und Empfehlungen zur simultanen Ziel- und Moduswahl

### Hinweise

- Hierarchisch und vollständig simultane Modelle unterscheiden sich grundsätzlich nur im Wert des Nest-Parameters. Im Fall eines hierarchisch simultanen Modells kann dieser im Bereich  $0 \leq \alpha_{go} \leq 1$  liegen und muss entsprechend bestimmt werden. Beim einem vollständig simultanen Modell ist der Parameter hingegen festgelegt mit  $\alpha_{go} = 1$ . Ein Nest-Parameter  $\alpha_{go} = 0$  führt zu einem sequentiellen Modell.
- Zur Ermittlung des Nest-Parameters bei hierarchisch simultanen Modellen existieren in der Praxis kaum geeignete Vorgehensweisen, da für eine hinreichende Schätzung meist eine zu große Anzahl an Zielwahlalternativen durch ein Schätzverfahren (z.B. Maximum-Likelihood-Methode) berücksichtigt werden müssen.
- Neben den vorgestellten Varianten von simultanen Ziel- und Moduswahlmodellen existieren zahlreiche weitere, die verschiedene Kombination von Fixierungen, Randsummenbedingungen und Gewichtungen sowie andere Entscheidungsmodelle verwenden.

### Empfehlungen

- Die simultane Modellierung der Ziel- und Moduswahl ist Stand der Technik und ihre Verwendung ist immer zu prüfen. Eine sequentielle Modellierung der Ziel- und Moduswahl sollte nur in Ausnahmefällen erfolgen.
- Simultane Ziel- und Moduswahlmodelle mit Entscheidungsmodell Typ Logit sind eher bei städtischen und regionalen Modellen einzusetzen, da Logit die absoluten Nutzenunterschiede zwischen Alternativen berücksichtigt, die (im Gegensatz zu relativen Nutzenunterschieden) nur im Nahbereich relevant sind.

Tabelle 5-6: Hinweise und Empfehlungen zur simultanen Ziel- und Moduswahl.

### 5.1.7 Abfahrtszeitwahl

Menschen führen Ortsveränderungen durch, um an Aktivitäten teilzunehmen. Der Beginn und das Ende dieser Aktivitäten bestimmen die Zeitpunkte, zu denen Ortsveränderungen durchgeführt werden müssen. Diese Zeitpunkte definieren Wunschabfahrtszeiten (z.B. Arbeits- oder Ausbildungsende) oder Wunschankunftszeiten (z.B. Arbeits- oder Ausbildungsbeginn) für Ortsveränderungen. Die Wunschabfahrts- oder Wunschankunftszeit ergibt sich deshalb bereits aus der Aktivitätenwahl. Wunschabfahrtszeit und tatsächliche Abfahrtszeit können aus zwei Gründen voneinander abweichen:

- Im Individualverkehr können die Verkehrsteilnehmenden die Abfahrtszeit grundsätzlich frei wählen. Fahrtzeitverlängerungen in der Hauptverkehrszeit können in gewissem Umfang zu einer Anpassung der Abfahrtszeit führen. Wenn viele Verkehrsteilnehmende ihre Abfahrtszeitwahl anpassen, kann das zu Wirkungen führen, die als Peakspreading bezeichnet werden.
- Im öffentlichen Verkehr müssen die Verkehrsteilnehmenden ihre Abfahrtszeit an die vom Fahrplan vorgegebenen Fahrtzeiten anpassen und eine geeignete Verbindung wählen. Die Auslastung der öffentlichen Verkehrsmittel kann zusätzlich wie im Individualverkehr zu einer Anpassung der Abfahrtszeit führen.

Eine zeitliche Differenzierung der Verkehrsnachfrage ist immer dann notwendig, wenn die Verkehrsstärken für einzelne Zeiträume ermittelt werden sollen. Die zeitliche Differenzierung wird in Verkehrsnachfragemodellen mit zwei Methoden nachgebildet:

- Ermittlung der Wunschabfahrtszeit: Die Wunschabfahrtszeit ergibt sich aus den gewählten Aktivitäten. Für jeden Aktivitätenübergang (z.B. Wohnen – Arbeiten) wird aus beobachteten Tagesganglinien der Nachfrageanteil je Zeitintervall bestimmt. Auf diese Weise entstehen tageszeitabhängige Nachfragematrizen.
- Ermittlung der tatsächlichen Abfahrt: Die tatsächliche Abfahrt kann in eine dynamische Umlegung integriert werden. Dabei wird der Widerstand einer Route oder Verbindung um eine Komponente

ergänzt, die die zeitliche Nutzbarkeit beschreibt. Die zeitliche Nutzbarkeit ergibt sich aus der Zeitdifferenz zwischen angebotener Abfahrtszeit und Wunschabfahrtszeit.

## Hinweise und Empfehlungen zur Abfahrtszeitwahl

### Hinweise

- Eine zeitliche Segmentierung der Verkehrsnachfrage ist immer dann erforderlich, wenn die Verkehrsstärken für einzelne Zeiträume ermittelt werden sollen.
- Der Einsatz von beobachteten Tagesganglinien für eine Modellprognose ermöglicht es, zeitliche Änderungen der Verkehrsnachfrage abzubilden, die sich aus Veränderungen bei den Aktivitätenmustern für einen Prognosezeitpunkt ergeben. Zeitliche Verschiebungen der Nachfrage innerhalb einer Aktivität (z.B. flexible Arbeitszeiten, veränderte Ladenöffnungszeiten) können nicht abgebildet werden und erfordern Annahmen.
- Wenn Effekte eines Peakspreadings nachgebildet werden sollen, sind dynamische Umlegungsmodelle erforderlich, die die zeitliche Nutzbarkeit einer Route bzw. Verbindung berücksichtigen. Beobachtete Abfahrtszeiten können allerdings bereits umgesetzte Anpassungsreaktionen der Verkehrsteilnehmenden beinhalten.

### Empfehlungen

- Der zeitliche Verlauf der Aktivitätenübergänge soll im Modell für jede Aktivitätenkombination hinterlegt werden.
- Für verkehrstechnische Untersuchungen, Lärm- oder Emissionsberechnungen ist eine zeitliche Segmentierung mit Zeiträumen von je 60 Minuten ausreichend. Bei Spitzenstundenmodellen genügt es, den Anteil der Spitzenstunde zu hinterlegen.
- Eine feinere zeitliche Segmentierung (z.B. 96 Zeitintervalle von je 15 Minuten) ist dann erforderlich, wenn in Stadtregionen z.B. Auslastungseffekte im ÖV auf der Ebene von Fahrplanfahrten abgebildet werden sollen. Das kann in Zukunft bei der Abbildung von On-Demand-Angeboten eine Rolle spielen.

Tabelle 5-7: Hinweise und Empfehlungen zur Abfahrtszeitwahl.

### 5.1.8 Routenwahl und Verbindungswahl in der Umlegung

Umlegungsmodelle bilden die Routenwahl bzw. die Verbindungswahl der Verkehrsteilnehmenden ab und ermitteln so Verkehrsstärken im Netz. Bei einer statischen Umlegung wird die Nachfrage auf eine Menge von räumlich unterschiedlichen Routen verteilt, deren Eigenschaften sich im Betrachtungszeitraum nicht ändern. Bei dynamischen Umlegungen ist neben der Route auch der Zeitpunkt der Ortsveränderung relevant. Eine zeitlich differenzierte Route kann als Verbindung oder als Zeit-Weg-Trajektorie bezeichnet werden. Bei einer dynamischen Umlegung wird die Nachfrage folglich auf Verbindungen verteilt. Grundlage einer Umlegung ist das Verkehrsangebot und eine Nachfragematrix. Die Umlegung umfasst die folgenden Teilschritte:

#### 1. Routen- oder Verbindungssuche:

In diesem Teilschritt wird die Menge der Routen oder Verbindungen generiert, aus denen die Verkehrsteilnehmenden wählen können. Die Eigenschaften jeder Alternative werden durch Kenngrößen (Zeiten, Entfernungen, Umsteigehäufigkeiten, Kosten) beschrieben.

#### 2. Routen- oder Verbindungswahl:

In diesem Teilschritt wird die Verkehrsnachfrage auf die verfügbaren Routen oder Verbindungen verteilt. Dabei werden die Eigenschaften der Alternativen berücksichtigt, die zu einem Nutzenwert bzw. einem Widerstandswert zusammengefasst werden.

#### 3. Netzbelastung:

In diesem Teilschritt wird die Verkehrsstärke im Netz aus der Nachfrage einer Route oder Verbindung ermittelt. Bei einer dynamischen Umlegung wird die zeitabhängige Verkehrsstärke für jedes Netzelement entlang der Zeit-Weg-Trajektorie jeder Verbindung abgetragen. Hierzu kann im IV ein Verkehrsflussmodell eingesetzt werden.

#### 4. Ermittlung der Widerstände der Netzelemente:

In diesem Teilschritt wird aus der Verkehrsstärke und der Kapazität für jedes Netzelement und in dynamischen Modellen für jedes Zeitintervall eine Auslastung oder eine Verkehrsdichte ermittelt. Im IV ergibt sich aus der Auslastung bzw. der Verkehrsdichte eine Fahrtzeit im belasteten Netz. Im ÖV reduziert eine hohe Auslastung den Komfort (Sitzplatzverfügbarkeit) oder die Nutzbarkeit einer Alternative.

#### 5. Prüfung einer Abbruchbedingung:

Die Auslastungen der Netzelemente ändern den Nutzen bzw. den Widerstand einer Alternative, was wiederum die Wahlentscheidungen beeinflusst. Um diese Wechselwirkungen zu berücksichtigen, werden in Umlegungsmodellen Rückkopplungen in Form von Iterationen durchgeführt. Nach jeder Iteration wird geprüft, ob vorgegebene Abbruchbedingungen eingehalten werden. Die Abbruchbedingung eines Umlegungsverfahrens kann eine feste vorgegebene Zahl an Iterationen oder im Falle einer Gleichgewichtsumlegung ein zu erreichendes Konvergenzniveau sein. Das Konvergenzniveau beschreibt dabei den Abstand des erreichten Gleichgewichts von dem theoretisch möglichen Gleichgewicht im Netz.

Da sich IV und ÖV in ihrer Charakteristik zum Teil deutlich unterscheiden, kommen unterschiedliche Umlegungsmodelle zum Einsatz.

### 5.1.8.1 Umlegung im IV

#### Umlegungsmodelle

Umlegungsmodelle unterstellen, dass die Verkehrsteilnehmenden aufgrund ihrer Erfahrungen über die zu erwartende Verkehrslage im Netz informiert sind und ihre Routenwahl so anpassen, dass sich das System in einem Gleichgewichtszustand befindet. In diesem Zustand wechseln die Verkehrsteilnehmenden ihre Routen nicht mehr und die Fahrtzeiten bleiben konstant. Für den Gleichgewichtszustand existieren zwei Hypothesen, die zu unterschiedlichen Modellen führen:

- Deterministisches Nutzergleichgewicht:

Das deterministische Nutzergleichgewicht (Deterministic User Equilibrium – DUE) unterstellt, dass alle Verkehrsteilnehmenden die gleiche perfekte Information über den Widerstand im Straßennetz haben. Das führt zu einem Zustand, bei dem sich die Verkehrsteilnehmenden so auf die Routen verteilen, dass der Widerstand auf allen alternativen Routen gleich ist und jeder Wechsel auf eine andere Route den persönlichen Widerstand erhöhen würde (Wardrop [133]). Für alle benutzten alternativen Routen  $R$  (Verkehrsstärke  $q > 0$ ) muss also folgende Bedingung für den Widerstand  $w$  erfüllt sein:

$$\frac{w_i}{w_j} = 1 \quad \forall j = 1 \dots R \quad \text{und} \quad q_i > 0 \quad \text{bzw.} \quad q_j > 0$$

- Stochastisches Nutzergleichgewicht:

Das stochastische Nutzergleichgewicht (Stochastic User Equilibrium – SUE) geht davon aus, dass die Verkehrsteilnehmenden über keine vollständigen Informationen verfügen und ihre subjektiv

empfundene Fahrtdauer optimieren. Beim stochastischen Nutzergleichgewicht wird die Nachfrage abhängig vom Widerstand der Routen mit einem ökonometrischen Entscheidungsmodell (siehe Kapitel 5.1.1) auf die Alternativen verteilt. In diesem Fall ist bei der Aufteilung die Ähnlichkeit bzw. die Eigenständigkeit der Routen zu berücksichtigen, wenn sich die alternativen Routen einer Quelle-Ziel-Beziehung überlappen. Für das Logit-Modell ergibt sich so die folgende Form:

$$p_i = \frac{e^{\beta \cdot w_i} \cdot E_i}{\sum_{j=1}^N (e^{\beta \cdot w_j} \cdot E_j)}$$

mit

$p_i$  Anteil der Nachfrage auf Alternative  $i$

$w_i$  Widerstand der Alternative  $i$

$N$  Anzahl der Alternativen

$E_i$  Eigenständigkeit der Alternative  $i$ ,  $0 \leq E_i \leq 1$  (siehe Abbildung 5-10)

$\beta$  Skalierungsparameter

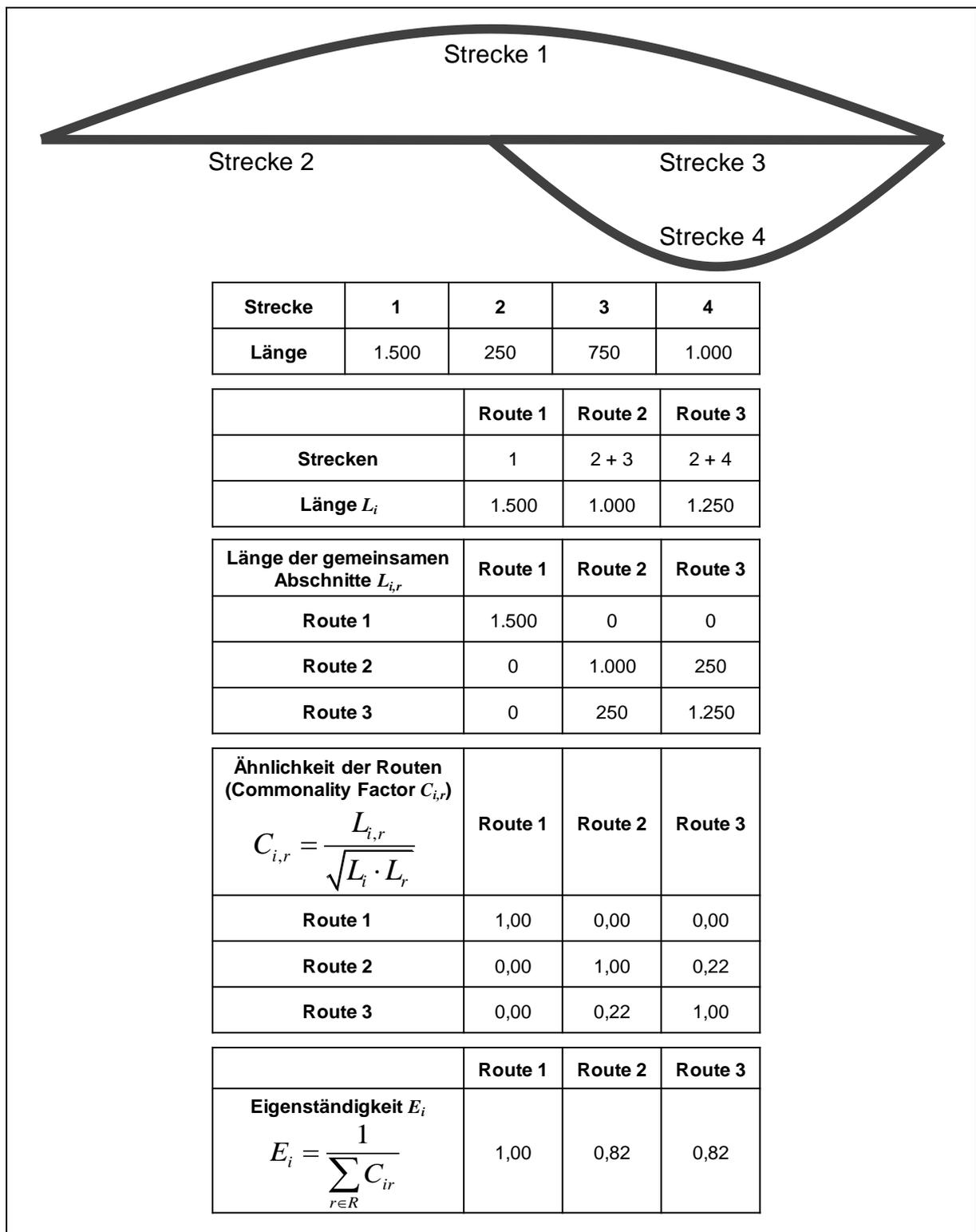


Abbildung 5-10: Beispiel für die Eigenständigkeit von Routenwahlalternativen (Bildquelle: in Anlehnung an Rieser et al.[107]).

Die Annahme perfekter Information im deterministischen Nutzergleichgewicht wird an einem konkreten Tag angesichts zufälliger Störungen im motorisierten Straßenverkehr nur eingeschränkt wirklichkeitsnah sein. Aufgrund seiner mathematischen Eigenschaften bietet sich dieses Modell trotzdem für die Analyse und Bewertung konkurrierender Maßnahmen im Rahmen der Straßennetzplanung an, da hier nicht ein konkreter Tag, sondern ein mittlerer Tag betrachtet wird. Stochastische Gleichgewichtsumlegungen können die Nachfrage besonders in Teilräumen und in

Zeiten mit geringer Nachfrage besser verteilen, da für das deterministische Gleichgewichtsverfahren hier meist nur eine Route – die widerstandkürzeste Route – erforderlich ist. Sie können außerdem die spezifische Informationsverfügbarkeit (z.B. bei einer Netzsteuerung) nachbilden.

Für Umlagungen im Radverkehr sind stochastische Umlagungen besser geeignet als deterministische Umlagungen, da es kaum auslastungsabhängige Fahrzeiterhöhungen gibt und bei Radfahrern die individuelle Wahrnehmung von Sicherheit, Komfort und Anstrengung eine große Rolle spielt. Dies wird als stochastischer Einfluss im Modell berücksichtigt.

Die mit einer Umlegung ermittelten Verkehrsstärken sollten nicht nur auf der Ebene der Strecken mit beobachteten Verkehrsstärken übereinstimmen. Die Umlegung sollte auch plausible Routen und Routenbelastungen liefern. Eine gute Umlegung erfüllt das Kriterium proportionaler Routenbelastungen (Boyce et al. [13]) vor. Dieses Kriterium fordert, dass die Nachfrage, die über eine Netzmasche abgewickelt wird, unabhängig von der Quelle und dem Ziel immer mit einem einheitlichen Verhältnis, d.h. proportional, auf die zwei alternativen Teilrouten der Netzmasche aufgeteilt wird (siehe Abbildung 5-11).

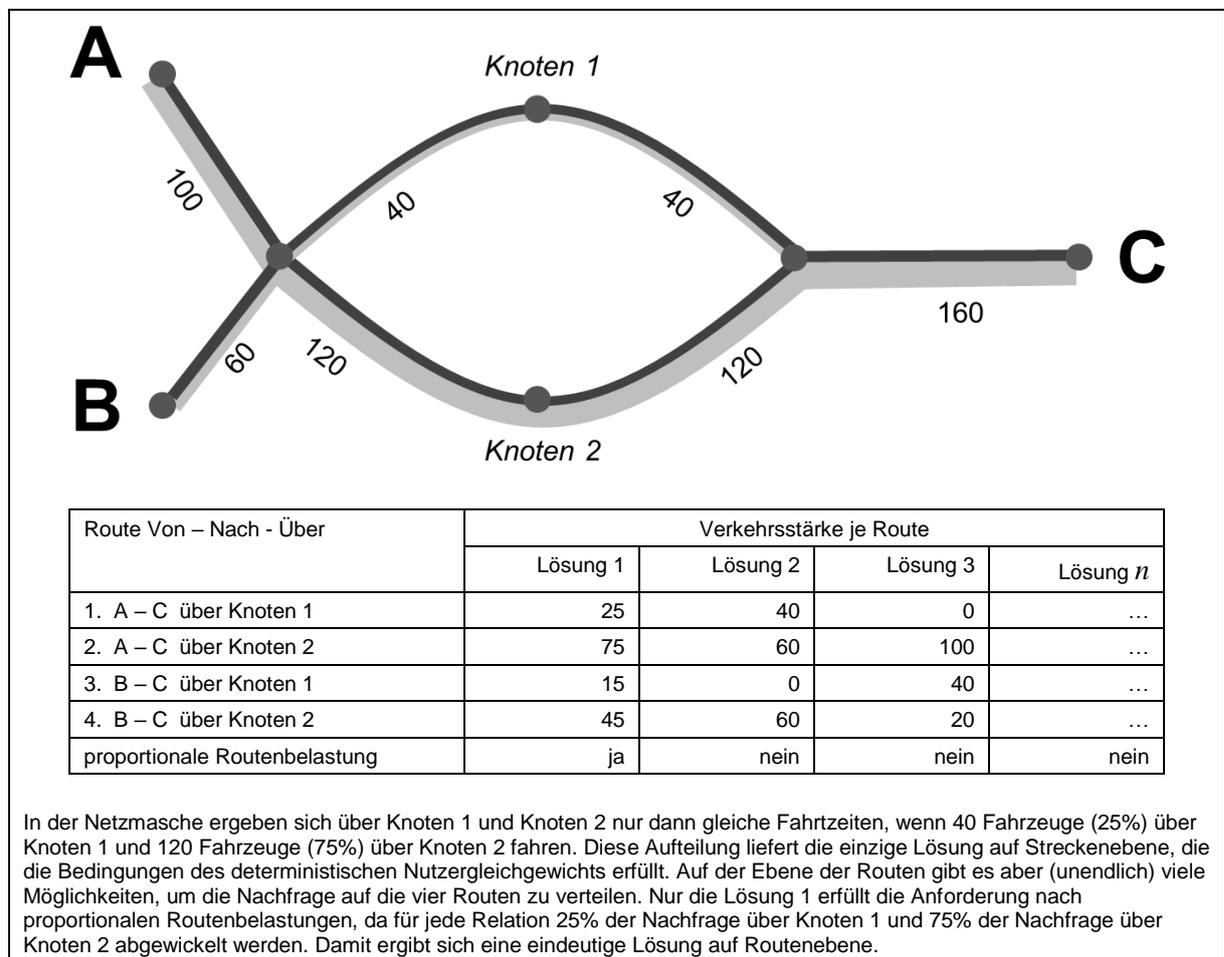


Abbildung 5-11: Beispiel für proportionale und nicht proportionale Routenbelastungen in einer Netzmasche (Bildquelle: in Anlehnung an Rieser et al. [107]).

Als Maß für die Konvergenz bei einem deterministischen Nutzergleichgewicht führen Boyce et al. [15] den Begriff des „Relative Gap“ ein. Der Relative Gap vergleicht den tatsächlichen Verkehrszeitaufwand im gesamten Netz mit einem hypothetischen minimalen Verkehrszeitaufwand, der sich ergibt, wenn alle Fahrzeuge die Fahrtzeit der kürzesten Route ihrer Quelle-Ziel-Relation nutzen könnten (siehe

Abbildung 5-12). Laut Boyce et al. [15] ist ein Relative Gap von maximal 0,01 % bzw.  $10^{-4}$  notwendig, um eine stabile Konvergenz (bezogen auf die streckenbasierten Verkehrsstärkenunterschiede) zu erhalten. Simon et al. [117] zeigen auf, wie der Relative Gap als Konvergenzkriterium für das stochastische Nutzergleichgewicht erweitert werden kann.

$$G = \frac{V_{Ist} - V_{Hypo}}{V_{Hypo}}$$

mit

$V_{Ist}$  tatsächlicher Verkehrszeitaufwand (Fahrzeugstunden) im gesamten Netz, der sich aus dem Produkt der Fahrtzeiten und Verkehrsstärken über alle Strecken ergibt

$V_{Hypo}$  hypothetischer Verkehrszeitaufwand (Fahrzeugstunden) im gesamten Netz, der sich ergibt, wenn alle Fahrzeuge die Fahrtzeit auf der zeitkürzesten Route nutzen könnten

Abbildung 5-12: Relative Gap als Konvergenzkenngroße bei der Gleichgewichtsumlegung.

Für die Lösung der Umlegungsaufgabe gibt es eine Vielzahl von Modellimplementierungen, die deterministische und stochastische Gleichgewichte genau oder näherungsweise berechnen. Einfache Lösungsverfahren wie eine Bestwegumlegung oder eine Sukzessivumlegung, die nach einer vorgegebenen Anzahl von Iterationen ohne Prüfung des Gleichgewichtszustands abbrechen, sind für praktische Planungsaufgaben nicht geeignet.

### Dynamische Umlegungsmodelle

Bei einer statischen Umlegung wird von einer konstanten Nachfrage und einem konstanten Verkehrsangebot innerhalb des Umlegungszeitraums ausgegangen. Dynamische Umlegungsverfahren betrachten zusätzlich eine Zeitachse. Auf diese Weise können tageszeitabhängige Änderungen der Nachfrage und des Angebots berücksichtigt werden. Hierbei wird die Fortbewegung der Verkehrsteilnehmenden entlang einer Route nachvollzogen. Somit entsteht die Information, zu welchem Zeitpunkt wie viel Nachfrage auf welchem Netzelement auftritt. Damit ermöglichen dynamische Umlegungsverfahren eine genauere Abbildung von Überlastungen.

Im MIV sind dynamische Umlegungsmodelle bisher in praktischen Anwendungen noch die Ausnahme, da die Attribuierung des Netzmodells mit realistischen Kapazitäten aufwändig ist und bei Verwendung eines Verkehrsflussmodells fehlerhafte Kapazitäten – insbesondere an den Knotenpunkten - die Fahrtzeiten und damit die Routenwahl über mehrere Zeitintervalle beeinflussen können. Eine dynamische Umlegung ist im MIV immer dann erforderlich, wenn stündliche Verkehrsstärken in Fernverkehrsmodellen ermittelt werden sollen. Hier überlagern sich die Ganglinien der Fernverkehre mit langen Reisezeiten und die Ganglinien der Regionalverkehre mit relativ kurzen Reisezeiten.

In regionalen Verkehrsnachfragemodellen mit begrenzter räumlicher Ausdehnung, in denen die mittlere Reisezeit unter einer Stunde liegt, kann man bei einer Stundenumlegung vereinfacht annehmen, dass alle Fahrzeuge ihr Ziel innerhalb der betrachteten Stunde erreichen. Dann genügt eine quasidynamische Umlegung, bei der die Nachfrage für jedes Zeitintervall eines Tages unabhängig von der Verkehrsnachfrage im vorangegangenen Zeitintervall mit sequentiellen statischen Umlegungen im Netz verteilt wird.

## Widerstandsfunktion

Für die Routenwahl werden alle entscheidungsrelevanten Kenngrößen in einer Widerstandsfunktion bzw. in einer Nutzenfunktion zusammengefasst. Eine Funktion, die die Komponenten Zeit, Länge, Kosten und Steigung umfasst, hat üblicherweise folgende Form:

$$w_{s,f}(q) = \beta_f^s(s) \cdot \beta_{STyp,f}^t \cdot t_{s,f}(q) + \beta_f^c \cdot c_{s,f} + \beta_f^l \cdot l_s$$

mit

$f$	Gruppe von Fahrzeugen mit besonderen Eigenschaften im Hinblick auf die Fahrzeugeigenschaften (z.B. Pkw und Lkw) oder im Hinblick auf die Nutzeigenschaften (privater Personenverkehr, Wirtschaftspersonenverkehr)
$w_{s,f}(q)$	Widerstand für Strecke $s$ für Fahrzeuge der Gruppe $f$ bei Verkehrsstärke $q$
$t_{s,f}(q)$	Fahrtzeit für Strecke $s$ für Fahrzeuge der Gruppe $f$ bei Verkehrsstärke $q$ . Die Fahrtzeit kann bei den Gruppen Pkw und Lkw unterschiedlich sein.
$c_{s,f}$	Kosten für die Nutzung der Strecke $s$ für Fahrzeuge der Gruppe $f$ , z.B. Straßenbenutzungsgebühren
$l_s$	Länge der Strecke $s$
$\beta_f^s(s)$	fahrzeuggruppenspezifischer und steigungsspezifischer Parameter für die Steigung $s$
$\beta_{STyp,f}^t$	nutzergruppen- und streckentypspezifischer Parameter für die Zeit $t$
$\beta_f^c$	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Kosten $c$
$\beta_f^l$	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Länge $l$

Der streckentypspezifische Parameter Zeit ermöglicht es, spezielle Streckentypen zu bevorzugen. Das ist insbesondere bei hochrangigen Straßen (Autobahnen) sinnvoll, da diese Straßen durch eine gute Beschilderung den nicht ortskundigen Fahrern oft als einzige Alternative bekannt sind oder da diese Straßen besonders gut für Lkw geeignet sind.

Nachstehende Tabelle zeigt Wertebereiche für die Parameter. Die Parameter können im Rahmen der Kalibrierung so angepasst werden, dass die Umlegungsergebnisse möglichst gut mit den Zählwerten übereinstimmen. Eine Erhöhung des Wertes von  $\beta_f^l$  führt zu einer Bevorzugung von direkten Routen.

Parameter	Wertebereich Pkw	Wertebereich Lkw
$\beta_{STyp,f}^t$ [1 / s] • Städtische Nebenstraßen • Städtische Hauptverkehrsstraßen • Regionale Straßen • Überregionale Straßen • Autobahnen	1,1 bis 1,3 0,9 bis 1,0 1,0 bis 1,1 0,8 bis 1,0 0,7 bis 0,9	1,1 bis 1,5 0,9 bis 1,0 1,0 bis 1,1 0,8 bis 1,0 0,6 bis 0,9
$\beta_f^s(s)$ [-]	$\approx 1,0$	$\approx 1,0$ für $ s  < 4\%$ $> 1,0$ für $ s  > 4\%$
$\beta_f^l$ [1 / m]	0,01 bis 0,03	0,01 bis 0,03
$\beta_f^c$ [1 / €]	900 bis 225 (entspricht 4,0 bis 16,0 [€ / h])	120 bis 60 (entspricht 30,0 bis 60,0 [€ / h])
Zum Value of Time siehe z.B.: • Vrtic et al. (2007): Einbezug der Reisekosten bei der Modellierung des Mobilitätsverhaltens [132], • Axhausen et al. (2014): Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung [3], • Weis et al. (2016): SP-Befragung 2015 zum Verkehrsverhalten [135].		

Abbildung 5-13: Wertebereich für die Parameter einer Widerstandsfunktion für den Pkw bzw. Lkw.

## Fahrtzeiten und Kapazitäten

Die Fahrtzeiten im motorisierten Straßenverkehr werden in der Verkehrsumlegung mit Fahrzeitermittlungsmodellen bestimmt.

In makroskopischen Umlegungsmodellen wird am häufigsten ein sogenanntes *kapazitätsabhängiges Fahrzeitermittlungsmodell* eingesetzt. Bei freiem Verkehrsfluss ergibt sich die Fahrtzeit  $t_s^{free}$  für eine Strecke  $s$  aus der Streckenlänge und der Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss  $v_s^{free}$ . Für Abbiegebeziehungen an einem Knotenpunkt  $n$  wird die Abbiegezeit  $t_n^{free}$  direkt angegeben. Sie hängt von der Art der Knotensteuerung ab und wird in der Verkehrstechnik als Grundwartezeit bezeichnet. Im belasteten Netz ergeben sich die Streckenfahrtzeit und die Abbiegezeit über eine sogenannte Capacity-Restraint-Funktion (CR-Funktion<sup>8</sup>) aus der Auslastung. Die Auslastung ist dabei definiert als der Quotient aus der aktuellen Verkehrsstärke  $q$  und der Kapazität  $q^{max}$ . Bei Strecken wird die Fahrtzeit bei freiem Verkehrsfluss mit einem auslastungsabhängigen Faktor multipliziert. Bei Abbiegevorgängen an Knoten, wird die Grundwartezeit um einen absoluten Wert additiv erhöht, da die Wartezeit an einem Knoten nicht von der Grundwartezeit abhängt. Die CR-Funktion entspricht dann einem deterministischen Warteschlangenmodell, bei dem nach Erreichen der Kapazität jedes zusätzliche Fahrzeug die Fahrtzeit des Netzelements erhöht. Es ergeben sich so zwei Ausprägungen für die Fahrzeitermittlung:

$$\text{Fahrtzeit für eine Strecke } s: \quad t_s(q) = t_s^{free} \cdot f(\text{Auslastung}_s)$$

<sup>8</sup> Auch wenn Capacity Restraint ein englischer Begriff ist, wird in englischsprachigen Ländern von Volume-Delay-Funktionen (VDF) gesprochen

Fahrtzeit für einen Knotenabbieger  $n$ :  $t_n(q) = t_n^{free} + f(\text{Auslastung}_s)$

Es gibt zahlreiche Ausprägungen der CR-Funktion. Die wohl gängigste Variante für Strecken ist die sogenannte BPR-Funktion aus dem Traffic Assignment Manual des U.S.-amerikanischen Bureau of Public Roads (1964) [126]:

$$t_s(q) = t_s^{free} \cdot \left( 1 + \beta_1 \left( \frac{q_s}{q_s^{\max}} \right)^{\beta_2} \right)$$

mit

$t_s^{free}$  Fahrtzeit auf Strecke  $s$  bei freiem Verkehrsfluss

$t_s(q)$  Fahrtzeit auf Strecke  $s$  bei Verkehrsstärke  $q$

$\beta_1$  Funktionsparameter  $\beta_1 \in [0; \infty)$ , üblicherweise gilt  $0,1 \leq \beta_1 \leq 1,0$

$\beta_2$  Funktionsparameter  $\beta_2 \in [0; \infty)$ , üblicherweise gilt  $2,0 \leq \beta_2 \leq 8,0$

Ein kapazitätsabhängiges Fahrtzeitmodell betrachtet jede Strecke bzw. jeden Abbieger des Netzes unabhängig von den nachfolgenden Strecken. Es kann deshalb keine Rückstaueffekte abbilden.

Fahrtzeitermittlungsmodelle, die auf *Verkehrsflussmodellen* aufbauen, berücksichtigen im Gegensatz dazu die Interaktion benachbarter Strecken und können so als Teil einer dynamischen Umlegung Rückstaueffekte abbilden. Bei makroskopischen Verkehrsflussmodellen wird das Straßennetz in Abschnitte unterteilt, deren Geschwindigkeit aus der Verkehrsdichte abgeleitet wird. Der Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke, Dichte und Geschwindigkeit wird in einem Fundamentaldiagramm beschrieben. Wesentliche Inputdaten eines makroskopischen Flussmodells sind die Verkehrsstärke als Ergebnis der Umlegung und die Form des Fundamentaldiagramms. Kapazitätsdaten gehen über das Fundamentaldiagramm ein.

Fahrtzeitermittlungsmodelle benötigen für jedes Netzelement die Angabe einer Kapazität. Bei einer Stundenumlegung können die Kapazitätswerte für Strecken und Knotenströme aus dem HBS [55] abgeleitet werden. Bei einer statischen Umlegung über einen längeren Zeitraum wird angenommen, dass sich die Nachfrage gleichmäßig auf den Zeitraum verteilt. Deshalb müssen Schwankungen der Nachfrage über eine Anpassung der Kapazität abgebildet werden. Je nach Ausprägung der Nachfrageganglinie liegen die Hochrechnungsfaktoren von der Stundenkapazität auf die Tageskapazität in folgenden Bereichen:

- Strecken mit stark ausgeprägter Spitze: 8,0 bis 10,0
- Strecken mit mittel ausgeprägter Spitze: 10,0 bis 12,0
- Strecken mit gering ausgeprägter Spitze: 12,0 bis 14,0

Straßenzüge, die über viele Stunden des Tages ausgelastet sind, können höhere Hochrechnungsfaktoren haben.

## Hinweise und Empfehlungen zu Umlegungsmodellen für den IV

### Hinweise

- Einfache Umlegungsmodelle (z.B. Bestwegverfahren, Sukzessivverfahren), die nach einer vorgegebenen Anzahl von Iterationen und nicht aufgrund eines Konvergenzkriteriums abbrechen, sind für die Untersuchung von Maßnahmen nicht geeignet.
- Mit dem derzeitigen Wissensstand können keine eindeutigen Empfehlungen für deterministische oder stochastische Umlegungsmodelle gegeben werden. Deterministische Verfahren liefern mathematisch eindeutige Lösungen und sind etablierter. Stochastische Verfahren basieren auf den gleichen Entscheidungsmodellen wie die Ziel- und Moduswahl und bieten deshalb aus Sicht der Modelltheorie ein konsistenteres Gesamtmodell.
- Für die Berechnung des deterministischen Nutzergleichgewichts gibt es mehrere Verfahren. Diese Verfahren liefern eindeutige Verkehrsstärken auf den Strecken, können aber zu unterschiedlichen Routen führen. Bei der Wahl eines Umlegungsmodells sollte überprüft werden, ob die Umlegung das Kriterium "Proportionality of Routes" erfüllt.
- Deterministische Gleichgewichtsumlegungen generieren aufgrund der Annahme perfekter Information in Teilräumen oder in Zeiten mit geringer Auslastung für viele Relationen nur eine Route, die der Route einer Bestwegumlegung entspricht. Bei Routen mit ähnlicher Fahrzeit, bei denen eine gleichmäßige Aufteilung der Nachfrage zu erwarten ist, belastet die deterministische Umlegung dann nur die widerstandskürzeste Route. Besonders in feinmaschigen Netzen kann das zu nicht-symmetrischen Netzbelastungen führen, wenn sich die kürzesten Routen im unbelasteten Netz in Hin- und Rückrichtung unterscheiden. Deterministische Gleichgewichtsumlegungen liefern deshalb realistischere Ergebnisse, wenn die Unterschiede zwischen der Fahrzeit im unbelasteten und im belasteten Zustand groß sind ( $> +20\%$ ).
- Stochastische Gleichgewichtsumlegungen verteilen die Nachfrage auch in schwach ausgelasteten Netzen realistisch auf Routen mit ähnlichen Reisezeiten. Stochastische Gleichgewichtsumlegungen erfordern jedoch Regeln für die Auswahl der zu berücksichtigenden Routen.
- Höhere Anforderungen an die Konvergenz erhöhen die Rechenzeiten. Bei nicht ausreichender Konvergenz können die Verkehrsstärkedifferenzen zwischen Bezugsfall und Planfall größer sein als die Maßnahmenwirkungen. Deshalb ist für alle Modellläufe immer eine vorgegebene Konvergenz einzuhalten. Welche Konvergenz angemessen ist, kann bei der Modellvalidierung überprüft werden (siehe Kapitel 8.7.4).
- Sollen Verkehrszustände abgebildet werden, die der Bemessungsstunde des HBS entsprechen (z.B. 50. Stunde des Jahres), dann sollte das Modell so parametrisiert werden, dass die modellierten Fahrzeiten etwa dem 80. Perzentil gemessener Fahrzeiten in der Spitzenstunde entsprechen (Die 50. Stunde entspricht einem Zustand, der im Mittel einmal pro Woche auftritt. Das entspricht dem 80. Perzentil der Spitzenstunde einer Woche mit 5 Werktagen).
- Statische Tagesumlegungen ermitteln einen Zustand, der die Wirklichkeit stark vereinfacht, da Fahrzeiten und Routenwahl tageszeitabhängig sind. Tageskapazitäten sind deshalb - anders als die verkehrstechnischen Kapazitäten einer Stunde - keine Werte, die sich allein aus den Eigenschaften der Verkehrsanlage ableiten lassen. Die Tageskapazität enthält Annahmen über die zeitliche Verteilung der Nachfrage. Bei einer ausgeprägten Spitzenstunde ist die Tageskapazität kleiner als bei einer gleichmäßigeren Verteilung der Nachfrage.

### Modellparameter

- Modellparameter, die bei der Kalibrierung angepasst werden können, sind neben den Widerstandsparametern die Parameter der CR-Funktion und die Kapazität.
- Parameter der CR-Funktion: Anpassung durch Vergleich von modellierten und beobachtete Fahrzeiten.
- Parameter für die Kosten: siehe diverse Studien zu Zeitkosten (z.B. Weis et al. [135] oder Axhausen et al. [3]).

### Empfehlungen

- Umlegungsmodelle Kfz: Deterministisches oder stochastisches Nutzergleichgewicht, keine Bestweg- oder Sukzessivumlegung.
- Umlegungsmodelle Rad: Stochastische Umlegung.
- Konvergenz beim deterministischen Nutzergleichgewicht: Relative Gap  $< 0,0001$ .
- Konvergenz beim stochastischen Nutzergleichgewicht: Nutzenänderung über alle Routen zwischen zwei Iterationsschritten  $< 0,001$ .
- Ermittlung stündlicher Verkehrsstärken: Quasidynamische Umlegungen oder statische Umlegungen für ausgewählte Tageszeiten.
- Knotenwiderstände: städtische Netzmodelle sollten immer Fahrzeiten für Abbiegevorgänge enthalten.
- Straßenbenutzungsgebühren sollen in die Widerstandsfunktion aufgenommen werden.

### Optional

- Ermittlung stündlicher Verkehrsstärken in Netzen mit langen Fahrzeiten: Dynamische Umlegung

Tabelle 5-8: Hinweise und Empfehlungen zu Umlegungsmodellen für den IV.

### 5.1.8.2 Umlegung im ÖV

#### Umlegungsmodelle

Für die Modellierung von Ortsveränderungen mit dem ÖV gibt es drei Modellklassen. Sie unterscheiden sich durch die erforderlichen Eingangsdaten, die Modellannahmen und die Genauigkeit der Ergebnisse:

- Streckenbasierte Modelle:

Streckenbasierte Modelle sind ÖV-spezifische Bestwegumlegungen, bei denen die gesamte Nachfrage einer Route zugeordnet wird. Diese Verfahren erfordern kein Liniennetz mit einem Fahrplan, es genügen Fahrzeiten auf Strecken und Umsteigewiderstände bei Übergängen zwischen Straße und Schiene.

Streckenbasierte Modelle ermöglichen Fahrzeitabschätzungen. Umsteigehäufigkeiten und Umsteigewartezeiten sowie Bedienungshäufigkeiten können nicht berechnet werden. Die Modelle bilden die Routenwahl nicht realistisch ab. Sie geben einen Überblick über die Struktur der Verkehrsnachfrage und eignen sich im Rahmen einer Grobplanung zur Ermittlung eines „Wunschliniennetzes“, bei dem die Fahrgäste ohne Beschränkungen durch Linienwege und Fahrpläne die für sie schnellste Route im Netz wählen.

- Taktbasierte Modelle:

Taktbasierte Modelle ermitteln die Umsteigewartezeit beim Linienwechsel aus der mittleren Fahrzeugfolgezeit der Folgelinie. Bei Bedarf können Koordinierungen sowohl beim Umstieg zwischen Linien als auch zwischen den Fahrplänen mehrerer Linien auf gemeinsam bedienten Abschnitten berücksichtigt werden.

Taktbasierte Modelle eignen sich für städtische Netze mit kurzen Fahrzeugfolgezeiten, in denen die Koordinierung des Fahrplans nicht berücksichtigt werden muss. Sie sind auch für konzeptuelle Planungen mit langem Vorlauf sinnvoll, bei denen der exakte Fahrplan noch unbekannt ist.

- Fahrplanbasierte Modelle:

Fahrplanbasierte Modelle berücksichtigen den genauen Fahrplan und ermitteln für jeden Umstieg die exakte Umsteigewartezeit.

Fahrplanbasierte Modelle eignen sich für städtische, regionale, großräumige und teilnationale Modelle. Sie müssen immer dann angewendet werden, wenn das ÖV-Angebot große Fahrzeugfolgezeiten aufweist und die Koordinierung des Fahrplans für Umsteigevorgänge wichtig ist. Der Einsatz fahrplanbasierter Modelle führt in der Prognose zu Schwierigkeiten, wenn für den Prognosezeitpunkt keine koordinierten Fahrpläne, sondern nur Takte vorliegen. Um in diesem Fall fahrplanbasierte Modelle trotzdem nutzen zu können, kann der Parameter für die Bewertung der Umsteigewartezeit auf 0 gesetzt und der Parameter für die Bewertung der Umsteigehäufigkeit erhöht werden.

Ergebnis der strecken- und taktbasierten Umlegungsmodelle sind Routen mit Verkehrsstärken. Fahrplanbasierte Modelle ermitteln dagegen Verbindungen, d.h. sie enthalten zusätzliche Informationen über den Abfahrtszeitpunkt.

	Streckenbasiert	Taktbasiert	Fahrplanbasiert
Input	Fahrtzeiten auf Strecken	Linienwege Fahrtzeiten Takte	Linienwege Fahrtzeiten Fahrplanfahrten
Umsteigewartezeit	-	abhängig vom Takt	aus Fahrplan
Routenwahl	kürzester Weg	Menge kürzester Wege für jede mögliche Kombination von Abfahrtszeiten	Aufteilung mit einem diskreten Entscheidungsmodell
Zeitachse	nein	nein	ja
Output pro Relation	eine Route Reisezeit	≥ 1 Route Reisezeit Umsteigezeit Umsteigehäufigkeit Bedienungshäufigkeit	≥ 1 Verbindung Reisezeit Umsteigezeit Umsteigehäufigkeit Bedienungshäufigkeit Anpassungszeit

Tabelle 5-9: Eigenschaften von Umlegungsmodellen für den ÖV.

### Dynamische Umlegungsmodelle

Fahrplanbasierte Umlegungsmodelle fallen in die Klasse der dynamischen Umlegungen. Sie sind Stand der Technik und eignen sich für die Ermittlung tageszeitabhängiger Verkehrsstärken und Auslastungen. Die Ergebnisqualität wird maßgeblich von der zeitlichen Aufteilung der Nachfrage beeinflusst.

### Widerstandsfunktion

Für die Routen- bzw. Verbindungswahl werden alle entscheidungsrelevanten Kenngrößen in einer Widerstandsfunktion bzw. in einer Nutzenfunktion zusammengefasst. Eine Funktion, die die Komponenten Zeitaufwand, Umsteigehäufigkeit, Kosten und zeitliche Nutzbarkeit umfasst, kann dann folgende Form haben:

$$\begin{aligned}
 W_{r,g} &= \beta_g^{ERZ} \cdot t_{r,g}^{ERZ} + \beta_g^c \cdot c_{r,g} + \overbrace{\beta_g^{früh} \cdot \Delta t_r^{früh} + \beta_g^{spät} \cdot \Delta t_r^{spät}}^{\text{nur bei fahrplanbasierten Modellen}} \\
 t_{r,g}^{ERZ} &= \beta_g^{FZ} \cdot t_r^{FZ} + \beta_g^{ZAZ} \cdot t_r^{ZAZ} + \beta_g^{UWZ} \cdot t_r^{UWZ} + \beta_g^{UH} \cdot n_r^{UH}
 \end{aligned}$$

mit

$g$  Gruppe von Nutzern mit ähnlichen Eigenschaften (Wegezzweck, Personengruppe)

$W_{r,g}$  Widerstand für die Route / Verbindung  $r$  für Nutzer der Gruppe  $g$

$t_r^{ERZ}$  Empfundene Reisezeit für die Route / Verbindung  $r$  für Nutzer der Gruppe  $g$

$t_r^{FZ}$  Fahrtzeit im Fahrzeug für die Route / Verbindung  $r$

$t_r^{ZAZ}$  Zu- und Abgangszeit für die Route / Verbindung  $r$

$t_r^{UWZ}$  Umsteigewartezeit für die Route / Verbindung  $r$

$n_r^{UH}$	Anzahl Umsteigevorgänge für die Route / Verbindung $r$
$c_{r,g}$	Kosten für die Nutzung der Route / Verbindung $r$ für Nutzer der Gruppe $g$
$\Delta t_r^{früh}$	Zeitdifferenz zwischen angebotener Abfahrtszeit und Wunschabfahrtszeit für den Fall, dass die angebotene Abfahrtszeit vor der Wunschabfahrtszeit liegt
$\Delta t_r^{spät}$	Zeitdifferenz zwischen angebotener Abfahrtszeit und Wunschabfahrtszeit für den Fall, dass die angebotene Abfahrtszeit nach der Wunschabfahrtszeit liegt
$\beta_g^{ERZ}$	nutzergruppenspezifischer Parameter für die empfundene Fahrtzeit
$\beta_g^{FZ}$	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Fahrtzeit
$\beta_g^{ZAZ}$	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Zu- und Abgangszeit
$\beta_g^{UWZ}$	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Umsteigewartezeit
$\beta_g^{UH}$	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Umsteigehäufigkeit
$\beta_g^{früh}$	nutzergruppenspezifischer Parameter für Abfahrten vor der Wunschabfahrtszeit
$\beta_g^{spät}$	nutzergruppenspezifischer Parameter für Abfahrten nach der Wunschabfahrtszeit
$\beta_g^c$	nutzergruppenspezifischer Parameter für die Kosten $c$

Nachstehende Tabelle zeigt Wertebereiche für die Parameter. Die Parameter können im Rahmen der Kalibrierung so angepasst werden, dass die Umlegungsergebnisse möglichst gut mit den Zählwerten übereinstimmen.

Parameter	Wertebereich
$\beta_g^{ERZ}$ und $\beta_g^{FZ}$ [1 / s]	$\approx 1,0$
$\beta_g^{ZAZ}$ und $\beta_g^{UWZ}$ [1 / s]	$\approx 1,0$ bis $2,0$
$\beta_g^{UH}$ [min / Umstieg]	$\approx 1,0$ bis $15,0$
$\beta_g^{früh}$ und $\beta_g^{spät}$ [1 / s]	$\approx 1,0$ , wenn zeitliche Auflösung der Wunschabfahrtszeiten bei 10 min (städtische Modelle) bzw. 60 min (nationale Modelle) liegt
$\beta_g^c$ [1 / €]	900 bis 225 (entspricht 4,0 bis 16,0 [€ / h])
Zum Value of Time siehe z.B.: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vrtic et al. (2007): Einbezug der Reisekosten bei der Modellierung des Mobilitätsverhaltens [132],</li> <li>• Axhausen et al. (2014): Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung [3],</li> <li>• Weis et al. (2016): SP-Befragung 2015 zum Verkehrsverhalten [135].</li> </ul>	

Abbildung 5-14: Wertebereich für die Parameter einer ÖV-Umlegung.

### Fahrtzeiten und Kapazitäten

Die Fahrtzeiten im ÖV sind im Fahrplan niedergelegt. In den Modellen wird davon ausgegangen, dass die Fahrtzeiten eingehalten werden. Verspätungen werden nicht abgebildet. Umlegungsmodelle im ÖV können trotzdem, analog zu IV-Umlegungen, auslastungsabhängige Komponenten aufweisen, die die Platzverfügbarkeit berücksichtigen. Dazu wird die Widerstandsfunktion um eine auslastungsabhängige Komponente ergänzt, die die Auslastung jedes Fahrplanfahrabschnitts, d.h. jeder Fahrplanfahrt zwischen zwei Haltestellen auswertet:

$$w_{r,g} = \beta_g^{ERZ} \cdot t_{r,g}^{ERZ} + \beta_g^c \cdot c_{s,g} + \beta_g^{früh} \cdot \Delta t_r^{früh} + \beta_g^{spät} \cdot \Delta t_r^{spät} + \underbrace{\beta^{Ausl} \cdot w_r^{Ausl}}_{\text{Auslastungsabhängige Komponente}}$$

$$w_r^{Ausl} = \sum_{v \in V} \frac{q_v}{q_v^{Max}} \cdot t_v^{FZ} \quad (\text{Beispiel für eine lineare Auslastungsfunktion})$$

mit

$g$  Gruppe von Nutzern mit ähnlichen Eigenschaften (Wegezzweck, Personengruppe)

$w_r^{Ausl}$  Auslastungsabhängiger Widerstand für die Route / Verbindung  $r$ . Dieser Widerstand ergibt sich aus der Auslastung aller Fahrplanfahrt-Abschnitte  $v$  der Verbindung

$q_v$  Verkehrsstärke eines Fahrplanfahrt-Abschnitts  $v$

$q_v^{Max}$  Platzkapazität eines Fahrplanfahrt-Abschnitts  $v$

$\beta^{Ausl}$  Parameter für die Auslastung

## Hinweise und Empfehlungen zu Umlegungsmodellen für den ÖV

### Hinweise

- Taktbasierte Modelle ermitteln häufig eine zu große Umsteigewartezeit. Deshalb sollte der Parameter für die Bewertung der Umsteigewartezeit eher klein gewählt werden.
- Bei fahrplanbasierten Modellen hat die Zeitdifferenz zwischen angebotener Abfahrtszeit und Wunschabfahrtszeit einen großen Einfluss auf die Wahl. Deshalb sollten die Zeitintervalle klein sein ( $\Delta t \leq$  typischer Takt), auch wenn die Nachfrageganglinien nicht in dieser Auflösung vorliegen.

### Modellparameter

- Modellparameter, die bei der Kalibrierung angepasst werden können, sind die  $\beta$ -Parametern der Nutzenfunktion. Sie können aus Fahrgastbefragungen, die die Fahrtroute erfassen, oder aus anderen Modellen abgeleitet werden.
- Parameter für die Kosten: siehe diverse Studien zu Zeitkosten (z.B. Weis et al. [135] oder Axhausen et al. [3]).

### Empfehlungen

- Umlegungsmodelle: Fahrplanbasiert, in städtischen Modellen auch taktbasiert

### Optional

- Auslastungsabhängige Umlegung

Tabelle 5-10: Hinweise und Empfehlungen zu Umlegungsmodellen für den ÖV.

### 5.1.9 Rückkopplungen zwischen den Modellstufen

Wie bereits im Kapitel 2.2.3.5 erläutert, sollte eine Rückkopplung zwischen den Modellstufen vorgesehen werden. Mit dieser Rückkopplung lassen sich Aufwandsänderungen, die sich erst in späteren Modellstufen ergeben (i.d.R. in der Umlegung), in den vorgelagerten Entscheidungsprozessen berücksichtigen. Stand der Technik ist es, die Modellstufen Zielwahl, Moduswahl und Umlegung über eine Rückkopplung zu verknüpfen, so dass die in der Umlegung berechneten Reisezeiten in die Zielwahl und die Moduswahl eingehen. Gleichzeitig gibt es auch Ansätze, die Modellstufen Zielwahl, Moduswahl und Umlegung in eine Modellstufe zu integrieren.

In mikroskopischen Nachfragemodellen, die Einzelpersonen als diskrete Objekte modellieren, kann die Rückkopplung durch die Nachbildung von Lernprozessen realisiert werden. Jedes Personenobjekt bekommt dazu ein „Gedächtnis“, in dem Erfahrungen (insbesondere Reisezeiten) aus vorangegangenen Tagen gespeichert werden und bei späteren Entscheidungen als Erfahrungswerte mit einfließen.

Bei einer Rückkopplung zwischen den Modellstufen Zielwahl, Moduswahl und Umlegung werden die Modellstufen iterativ solange durchgeführt, bis sich im System ein Gleichgewichtszustand einstellt. Das ist dann der Fall, wenn sich die Struktur der Verkehrsnachfrage oder die Reisezeitmatrix zwischen zwei Iterationsschritten  $n$  und  $n-1$  nicht mehr ändert. In der Praxis müssen dafür Grenzwerte  $\mathcal{E}$  definiert werden. Diese Grenzwerte müssen entweder auf Ebene einzelner Netzelemente (Verkehrsstärken auf Strecken), auf der Ebene einzelner Relationen (Wege oder Reisezeiten zwischen Verkehrszellen) oder auf der Ebene des gesamten Netzes eingehalten werden.

### Grenzwerte auf der Ebene von Netzelemente und Relationen

Üblich sind Grenzwerte für die absolute und die relative Abweichung, die mit einer ODER-Bedingung verknüpft werden.

$$\text{absolute Abweichung} \quad |x_n - x_{n-1}| < \varepsilon_a \text{ oder}$$

$$\text{relative Abweichung} \quad \left| 1 - \frac{x_n}{x_{n-1}} \right| < \varepsilon_r$$

mit

$x$  Kenngröße, die im Gleichgewicht sein muss (Reisezeit oder Verkehrsstärke)

$\varepsilon_r$  Grenzwert für die relative Abweichung (z.B. 0,01)

$\varepsilon_a$  Grenzwert für die absolute Abweichung (z.B. 5 Fahrten oder 10 Sekunden)

Die Kenngröße  $x$  kann sich dabei auf Strecken, auf Routen oder auf Relationen beziehen. Die Grenzwerte müssen für einen vorgegebenen Anteil (z.B. 95%) der betrachteten Objekte eingehalten werden.

### Grenzwerte auf der Ebene des gesamten Netzes

Alternativ kann die Konvergenz auch mit einem globalen Wert ausgedrückt werden. Ein globales Abbruchkriterium hat den Vorteil, dass die iterative Rückkopplung auch beendet werden kann, wenn im Laufe der Iteration immer wieder wechselnde Änderungen zwischen wenigen Netzelementen auftreten, z.B. wiederkehrende Verkehrsstärkenverschiebungen zwischen denselben zwei Routen. Die Konvergenz tritt mit einem globalen Kriterium schneller ein, allerdings kann in diesem Fall kein Rückschluss auf die Konvergenz einzelner Routen oder Relationen gemacht werden. Zur Bestimmung der Konvergenz mit einem globalen Wert schlagen Boyce et al. [14] die „Anzahl der fehlplatzierten Nachfrage (Total Misplaced OD Flow  $TMF$ )“ vor. Daneben kann die Konvergenz auch mit der „Wurzel des quadrierten Quelle-Ziel-Fehlers (Root Squared OD Error  $RSE$ )“ quantifiziert werden. Beide Werte sollen am Ende der Iteration jeweils kleiner als ein Grenzwert  $\varepsilon$  sein.

$$TMF = \sum_{od} |d_{od,n-1} - d_{od,n}|$$

$$RSE = \sqrt{\sum_{od} (d_{od,n-1} - d_{od,n})^2}$$

mit

$d_{od,n-1}$  Nachfrage zwischen den Zellen  $o$  und  $d$  aus dem vorherigem Iterationsschritt  $n-1$ . Boyce et al. [14] verwenden hierfür einen geglätteten Wert  $\bar{d}_{od,n-1}$  aus dem vorherigem und aktuellem Iterationsschritt (siehe nächstes Unterkapitel).

$d_{od,n}$  Nachfrage zwischen den Zellen  $o$  und  $d$  aus aktuellem Iterationsschritt  $n$

Laut Boyce et al. [14] ist die notwendige Anzahl an Iterationsschritten  $n$  erreicht, wenn das Verhältnis aus fehlplatzierter Nachfrage ( $TMF$ ) und Gesamtnachfrage kleiner als 1% ist:

$$\frac{TMF}{\sum_{od} d_{od,n}} < 0,01$$

Es ergibt sich demzufolge ein einzuhaltender Grenzwert  $\varepsilon$  von:

$$TMF < 0,01 \cdot \sum_{od} d_{od,n} = \varepsilon$$

### Glättung der Modellergebnisse

Damit die Modellergebnisse konvergieren, können die Kenngrößen  $x$  zwischen zwei Iterationsschritten über eine Glättungsfunktion gedämpft werden. Die Glättung kann als ein Lernprozess der Verkehrsteilnehmenden interpretiert werden, der die unterschiedlichen Erfahrungen mehrerer Tage verknüpft. Der geglättete Widerstand entspricht dann dem für den aktuellen Iterationsschritt (Tag) erwarteten Widerstand.

Die exponentielle Glättungsfunktion arbeitet mit einer Glättungskonstanten ( $\lambda$ ), der ein Wert zwischen 0 und 1 zugeordnet wird:

$$x_n^* = \lambda \cdot x_n + (1 - \lambda) \cdot x_{n-1}^*$$

mit

$x_n^*$                     geglättete Kenngröße für den aktuellen Iterationsschritt  $n$

$x_{n-1}^*$                     geglättete Kenngröße für den vorherigen Iterationsschritt  $n-1$

$x_n$                       tatsächliche Kenngröße für den aktuellen Iterationsschritt  $n$

$\lambda$                         Glättungsparameter  $0 \leq \lambda \leq 1$

Die Glättungskonstante  $\lambda$  bzw. der Teilterm  $\lambda-1$  repräsentieren die Gewichte, mit denen der vorherige und der aktuelle Iterationsschritt gemittelt werden. Für  $\lambda = 0,5$  ermittelt die Methode den Durchschnitt zwischen der tatsächlichen und der geglätteten Kenngröße. Boyce et al. [14] empfehlen ein  $\lambda = 0,75$ , also ein Gewicht von 0,75 für den aktuellen Iterationsschritt und ein Gewicht von 0,25 für den vorherigen Iterationsschritt.

Je kleiner  $\lambda$ , desto größer ist der Einfluss des vorherigen Iterationsschritts. Um zu erreichen, dass mit zunehmender Zahl von Iterationsschritten der Einfluss des tatsächlichen Widerstands abnimmt, kann  $\lambda$  als Funktion von  $n$  definiert werden:

$$\lambda = \frac{1}{n}$$

Die sich ergebende Methode wird als „Method of Successive Averages (MSA)“ bezeichnet:

$$x_n^* = \frac{1}{n} \cdot x_n + \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot x_{n-1}^* = \frac{1}{n} \cdot x_n + \left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot x_{n-1}^* = \frac{x_n + x_{n-1}^* \cdot (n-1)}{n}$$

## Hinweise und Empfehlungen zu Rückkopplungen zwischen den Modellstufen

### Hinweise

- Die Konvergenz zwischen den Modellstufen ist nachzuweisen. Ein Modell ist konvergent, wenn sich die relationsbezogenen Aufwände oder Nachfragewerte zwischen zwei Iterationsschritten nicht mehr ändern.
- Ein Modell konvergiert schneller, wenn die erste Reisezeitberechnung im Pkw-Verkehr in einem belasteten Netz erfolgt. Hierfür kann eine historische Matrix oder eine Matrix aus einem geeigneten Modellauf herangezogen werden.
- Für die Reisezeitberechnung im Pkw-Verkehr müssen die Lkw-Nachfragematrizen bekannt sein.
- Bei der Rückkopplung müssen die Reisezeitmatrizen für den ÖV nur dann in jedem Iterationsschritt neu berechnet werden, wenn eine kapazitätsabhängige ÖV-Umlegung durchgeführt wird.

### Empfehlungen

- Es soll eine Rückkopplung zwischen den Modellstufen stattfinden.
- Idealerweise konvergiert das Modell ohne Glättung. Wenn nachgewiesen werden kann, dass ein Modell nur mit Glättung konvergiert, dann sollte eine Glättung mit konstanten Gewichten ( $\lambda = 0,75$ ) durchgeführt werden.
- Die notwendige Anzahl an Iterationsschritten ist erreicht, wenn die fehlplatzierte Nachfrage ( $TMF$ ) für die Modi Pkw und ÖV jeweils kleiner als 1%, besser kleiner als 0,1% der Nachfrage des jeweiligen Modus ist.
- Wichtige globale Kenngrößen (Modal-Split, Personenkilometer) sollten für jeden Iterationsschritt protokolliert und verglichen werden.
- Wenn das Modell nach 5 Iterationsschritten nicht konvergiert, sollten die Gründe hierfür untersucht werden. Falls die Differenz des  $TMF$ -Wertes und die Differenz der Modal-Split-Werte für Pkw und ÖV zwischen zwei Iterationsschritten sinken, können weitere Iterationen sinnvoll sein. Wenn die Werte schwanken, kann eine Glättung notwendig sein.

### Optional

- Niedrigere Grenzwerte und weitere Iterationsschritte erhöhen die Konvergenz, verlängern aber die Rechenzeit.

Tabelle 5-11: Hinweise und Empfehlungen zu Rückkopplungen zwischen den Modellstufen.

### 5.1.10 Einsatz von Korrekturverfahren

Verkehrsnachfragemodelle sind mathematische Verfahren, die aus Daten zur Bevölkerungsstruktur und -verteilung, aus Flächennutzungsdaten, aus Daten der Verkehrsnetze und aus Daten zum Mobilitätsverhalten Verkehrsströme und Verkehrsstärken berechnen. Die Komplexität des Verkehrsgeschehens kann durch mathematische Verfahren allerdings nur eingeschränkt nachgebildet werden. Wie gut ein Modell die Realität nachbilden kann, kann mit heutigen Methoden nicht bestimmt werden. Allerdings kann man die Ergebnisse des Modells auf den verschiedenen Stufen mit empirischen Messungen vergleichen und so Abweichungen zwischen Modell und „gemessener Realität“ feststellen (vgl. Kapitel 8.7). Eine Anforderung an die Modellerstellung ist, dass diese Abweichungen durch eine gute Kalibrierung möglichst minimiert wird. Sind allerdings die Kalibrierungsmöglichkeiten erschöpft, kann das Modell nur durch Korrekturverfahren besser an diese Vergleichswerte angepasst werden (siehe z.B. Berücksichtigung von gewachsenen Strukturen in der Zielwahl in Kapitel 5.1.3). Korrekturverfahren ermitteln Korrekturwerte als multiplikative Korrekturfaktoren oder additive Korrektursummanden. Da diese Korrekturwerte für die Verkehrsprognose nicht berechnet bzw. fortgeschrieben werden können, beeinträchtigen die Korrekturfaktoren die Prognosefähigkeit des Modells.

Setzt man trotzdem Korrekturwerte zur Anpassung des Modells ein, sollte das vollkommen transparent durchgeführt werden. Das bedeutet, dass in der Dokumentation des Modellaufbaus die Herleitung der Korrekturwerte und die Einbindung in das Modell erklärt werden sollten. Außerdem sollten Korrekturwerte inhaltlich begründbar sein.

### Einsatz von Korrekturverfahren in den Modellstufen

Korrekturverfahren können in allen Stufen des Modells eingesetzt werden. Sie sollten immer auf die Daten der Modellstufe angewendet werden, deren Ergebnis angepasst werden soll. Soll beispielsweise der Modal-Split für einige Relationen angepasst werden, sollte dies durch Korrekturverfahren auf Matrixebene erfolgen und nicht durch Verwendung eines Streckenattributs.

In Tabelle 5-12 werden einige typische Korrekturwerte genannt, die in der Praxis meist multiplikativ verwendet werden:

Korrekturverfahren	Segment	Bezugsobjekt	Beispiel für den Einsatz
Korrekturwert erzeugte Wege	Personengruppe / Aktivität	Verkehrszelle	Vom Mittelwert abweichende Erzeugungsraten der Einwohner
Korrekturwert Attraktion	Aktivität, Strukturmerkmale	Verkehrszelle	Einkaufszentrum mit besonders hoher Attraktivität
Korrekturwert Zielwahl	Aktivität	Relation	Natürliche oder politische Grenzen, Sprachgrenzen oder empirische Pendlerverflechtung
Korrekturwert Moduswahl	Aktivität / Modus	Modus bzw. Personengruppe	Hoher Radverkehrsanteil in bestimmten Gemeinden
Korrekturwert Umlegungsmatrix	Verkehrssystem	Relation	Anpassung des Matrixwertes, sodass eine möglichst gute Übereinstimmung mit gezählten Verkehrsstärken erreicht wird
Korrekturwert Routenwahl IV	Verkehrssystem	Strecken-, Abbiegerattribut	Beschilderung oder Gewohnheit hat Einfluss auf die Routenwahl
Korrekturwert Routenwahl ÖV	Linie, Linienroute	Haltestelle, Linienroutenelement	Verspätungsanfälligkeit der betreffenden Linie, unattraktive Haltestellen

Tabelle 5-12: Korrekturwerte in den Modellstufen.

### Einsatz von Matrixkorrekturverfahren

Einen Sonderfall nehmen die Matrixkorrekturverfahren ein. Ein Matrixkorrekturverfahren greift erst am Ende der Modellberechnung ein und passt die Umlegungsmatrix  $D$  in einem Schritt an die Zählwerte an. Dadurch entsteht eine korrigierte Matrix  $D^K$ . Legt man diese korrigierte Matrix  $D^K$  auf dem Netz um, erhält man in der Regel eine gute Übereinstimmung zwischen Modellergebnissen und Zählwerten (siehe Abbildung 5-15).

Das Problem der Matrixkorrektur besteht darin, dass es für eine vorgegebene Menge an Zählwerten eine sehr große Menge von Matrizen gibt, mit denen die Zählwerte erreicht werden können. Um die am besten passende Matrix zu bestimmen, haben van Zuylen & Willumsen [127] ein Matrixkorrekturverfahren entwickelt, das auf dem Konzept Entropiemaximierung aufbaut und gleichzeitig die Struktur der unkorrigierten Modellmatrix als Gewichte nutzt. Die maximal mögliche Entropie einer Matrix tritt ein, wenn alle Elemente die gleiche Wahrscheinlichkeit haben, also jedes Matrixelement den gleichen Wert aufweist. Das Verfahren funktioniert wie eine Matrixermittlung mit Randsummenbedingungen bei der Zielwahl (siehe Anlage 2.3). Die für das Verfahren erforderliche Bewertungsmatrix ergibt sich dabei aber nicht aus einer Bewertung der Aufwände (z.B. Reisezeit),

sondern direkt aus der unkorrigierten Modellmatrix. Als Randsummenbedingungen werden anstelle der zellenbezogene Verkehrsaufkommenswerte die Zählwerte an Strecken genutzt.

Die Anwendung eines Matrixkorrekturverfahrens sollte immer nur eingesetzt werden, wenn alle Kalibrierungsmöglichkeiten des Modells ausgeschöpft wurden, da die durch das Verfahren berechneten Veränderungen in der Regel nicht begründbar sind. Es ist bei der Anwendung des Verfahrens daher darauf zu achten, dass die Struktur der Modellmatrix durch die Korrektur weitgehend erhalten bleibt. Das bedeutet Modellmatrix  $D$  und korrigierten Modellmatrix  $D^K$  sollten sehr ähnlichen Reiseweitenverteilungen (siehe Kapitel 8.7) und Quell- und Zielverkehrssummen haben.

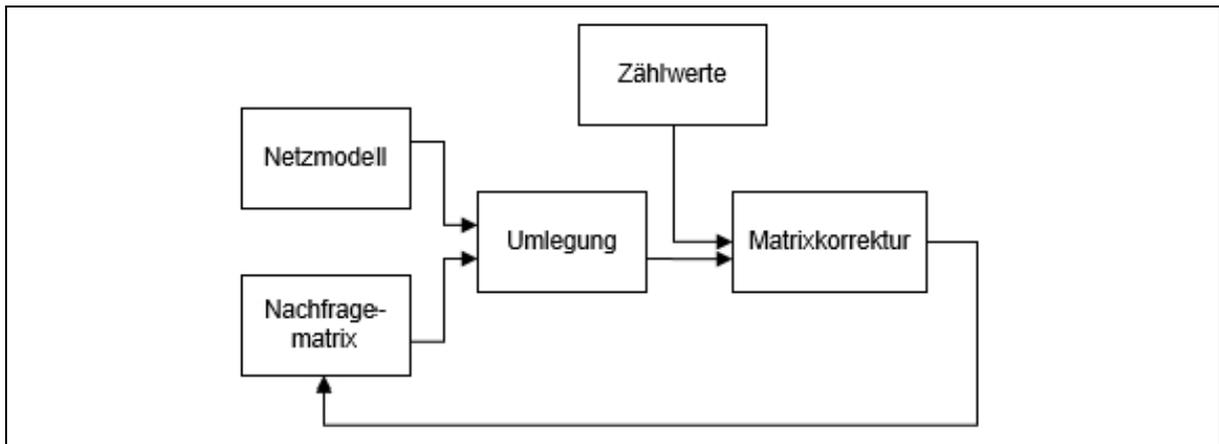


Abbildung 5-15: Anwendung Matrixkorrekturverfahren.

### Verwendung der Faktoren und der Matrixkorrektur in der Prognose

Für die Berechnung einer Verkehrsprognose (Bezugsfall) sollte für jeden Faktor entschieden werden, ob er weiterhin in die Modellberechnung eingehen sollte oder nicht. Wurde der Einsatz des Faktors begründet, muss beurteilt werden, ob der Grund bis zum Prognosezeitpunkt entfallen wird oder nicht. Für die Planung von Netzen kann es sinnvoll sein, Faktoren zu entfernen, wenn sie in der Analyse einen Zustand erzeugen, den man für die Planung bzw. in der Prognose nicht als Grundlage haben will (z.B. Einfluss der Beschilderung auf die Routenwahl). Bei Faktoren, von denen man glaubt, dass sie auch in Zukunft wirken, muss man entscheiden, ob man sie mit der gleichen Wirkung im Modell belässt oder ob man die Wirkung zurücknehmen kann.

Für den Fall der Matrixkorrektur gilt, dass wenn in der Modellerstellung für den Analysefall eine Matrixkorrektur durchgeführt wurde, diese auch in der Prognoseberechnung verwendet werden sollte.

Man kann aus der ursprünglichen Modellmatrix des Analysefalls  $D^A$  und der korrigierten Modellmatrix des Analysefalls  $D^{AK}$  sowohl eine Differenzmatrix  $D^D = D^{AK} - D^A$  als auch eine Faktormatrix  $D^F = D^{AK} / D^A$  berechnen. Diese Differenz- bzw. Faktormatrix wird benötigt, um aus der Modellmatrix des Bezugsfalles (Prognose) die Matrixkorrektur des Bezugsfalles abzuleiten. Eine Faktormatrix  $D^F$  kann auf Relationen mit sehr kleinen Modellwerten sehr große Faktoren aufweisen. Das ist z.B. bei einem unkorrigierten Matrixwert des Analysefalls  $d_{od}^A = 0,5$  und einem korrigierten Matrixwert des Analysefalls  $d_{od}^{AK} = 5$  der Fall. Hier ergeben sich ein Faktormatrixelement  $d_{od}^F = 10$  bzw. ein

Differenzmatrixelement  $d_{od}^D = 4,5$ . Hat sich der Wert auf dieser Relation im Bezugsfall (Prognose) z.B. durch einen starken Einwohnerzuwachs deutlich erhöht (z.B. auf  $d_{od}^P = 50$ ), würde die Anwendung des Faktors zu einem unrealistischen Einfluss der Korrektur führen ( $d_{od}^{PK} = d_{od}^P \cdot d_{od}^F = 500$ ), wohingegen die Anwendung der Differenzmatrix ( $d_{od}^{PK} = d_{od}^P + d_{od}^D = 54,5$ ) kaum ins Gewicht fällt. Auf der anderen Seite können durch die Anwendung der Differenzmatrix negative Werte entstehen, was vermieden werden muss.

Die Verrechnung mit Differenz- und Faktormatrizen kann auch kombiniert werden, um Nachteile der jeweiligen Methode auszugleichen. Dafür werden in Abbildung 5-16 verschiedene Methoden vorgestellt. Wie Abbildung 5-17 für ein Beispiel zeigt, führt die Kombination mit einem festem Grenzwert zu einem Sprung. Deshalb wird vorgeschlagen die Differenz- und Faktormatrix über den (arithmetischem oder harmonischem) Mittelwert zu kombinieren<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> In allen drei vorgestellten Methoden führt die Vermeidung von negativen Werten mit der  $\max(\ )$ -Funktion zu einer Unstetigkeit (Knick). Nur bei Methode 1 kann an der Stelle von  $\beta$  ein Knick nach unten auftreten (siehe Abbildung 5-17).

**Methode 1: Kombination mittels Grenzwert:**

$$d_{od}^{PK} = \begin{cases} d_{od}^P \cdot d_{od}^F & \text{für: } d_{od}^F \leq \beta \\ \max(0; d_{od}^P + d_{od}^D) & \text{für: } d_{od}^F > \beta \end{cases}$$

**Methode 2: Kombination mittels arithmetischem Mittelwert:**

$$d_{od}^{PK} = 0,5 \cdot (d_{od}^P \cdot d_{od}^F + \max(0; d_{od}^P + d_{od}^D))$$

**Methode 3: Kombination mittels harmonischem Mittelwert:**

$$d_{od}^{PK} = \sqrt{(d_{od}^P \cdot d_{od}^F) \cdot \max(0; d_{od}^P + d_{od}^D)}$$

mit

$d_{od}^P$  Ortsveränderungen  $d$  zwischen den Zellen  $o$  und  $d$  der unkorrigierten Modellmatrix des Bezugsfalls (Prognose)  $D^P$

$d_{od}^{PK}$  Ortsveränderungen  $d$  zwischen den Zellen  $o$  und  $d$  der korrigierten Modellmatrix Bezugsfalls (Prognose)  $D^{PK}$

$d_{od}^F$  Faktor zur Korrektur der Ortsveränderungen  $d$  zwischen den Zellen  $o$  und  $d$

$d_{od}^F = d_{od}^{AK} / d_{od}^A$ ,  $d_{od}^F \in$  Faktormatrix  $D^F$

$d_{od}^D$  Differenzwert zur Korrektur der Ortsveränderungen  $d$  zwischen den Zellen  $o$  und  $d$

$d_{od}^D = d_{od}^{AK} - d_{od}^A$ ,  $d_{od}^D \in$  Differenzmatrix  $D^D$

$d_{od}^A$  Ortsveränderungen  $d$  zwischen den Zellen  $o$  und  $d$  der unkorrigierten Modellmatrix des Analysefalls  $D^A$

$d_{od}^{AK}$  Ortsveränderungen  $d$  zwischen den Zellen  $o$  und  $d$  der korrigierten Modellmatrix des Analysefalls  $D^{AK}$

( $D^{AK}$  ist das Ergebnis eines Matrixkorrekturverfahrens)

$\beta$  maximaler Faktor in einer Faktormatrix für die „Methode Kombination mittels Grenzwert“,

z.B.  $\beta = 1,5$

Abbildung 5-16: Kombination verschiedener Matrixkorrekturverfahren.

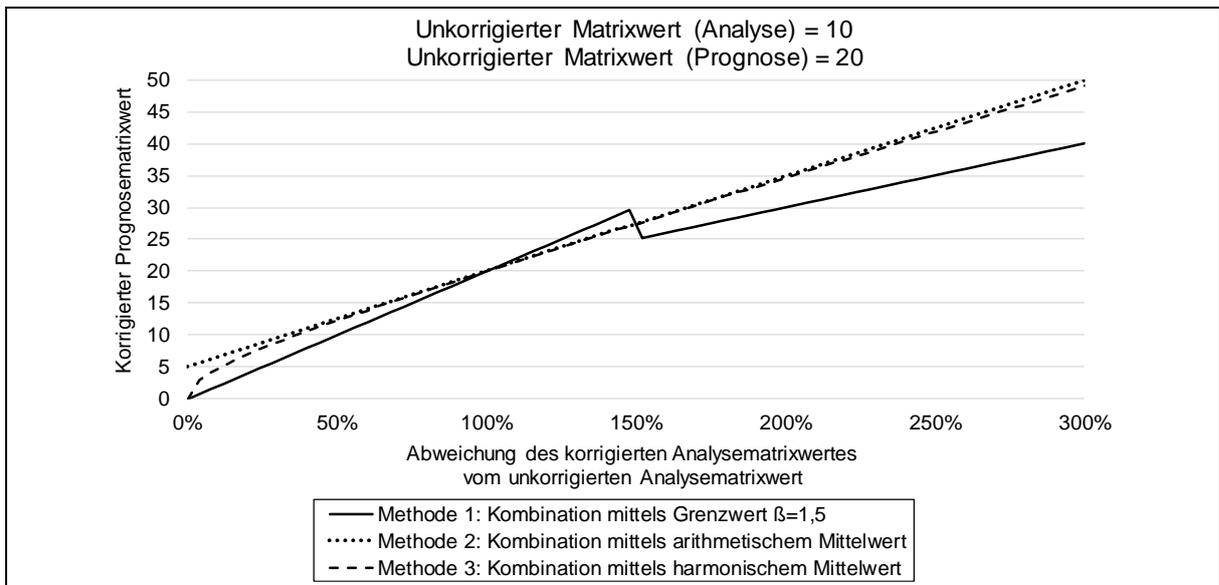


Abbildung 5-17: Beispiel für die Ermittlung des Prognosematrixwertes aus einer Differenz- und einer Faktormatrix.

## Hinweise und Empfehlungen zum Einsatz von Korrekturverfahren

### Hinweise

- Abweichungen zwischen modellierten und beobachteten Werten treten auf, wenn das Modell nicht alle verkehrsrelevanten Wirkungszusammenhänge abbildet oder wenn die verschiedenen Eingangsgrößen (z.B. Siedlungsstrukturdaten, Verhaltensdaten und Verkehrsstärken) nicht konsistent zusammenpassen (siehe Kapitel 8.3).
- Korrekturverfahren verbessern die Übereinstimmung zwischen modellierten und beobachteten Werten im Analysezustand ohne die genauen Ursachen zu kennen. Eine bessere Übereinstimmung wird in der Praxis als Hinweis für die Modellgenauigkeit verstanden. Sie werden deshalb von vielen Auftraggebern gewünscht.
- Korrekturverfahren verändern das Ergebnis der Modellierung. Die Veränderungen werden in der Regel unverändert in die Modellprognose übernommen. Der Teil des Verkehrs, der durch das Korrekturverfahren erklärt wird, kann in der Prognose weder durch Entwicklungen noch durch verkehrsplanerische Maßnahmen beeinflusst werden.
- Da beobachtete Werte auch nur eine „Beobachtung der Wirklichkeit“ sind und nicht die exakte Wirklichkeit (Messfehler, Schwankungen zwischen den Tagen, ...) darstellen, genügt es die beobachteten Werte bei der Korrektur hinreichend genau zu treffen, d.h. innerhalb der Validierungsgrenzen. So kann eine „Überanpassung“ des Modells vermieden werden.
- Bei einer Matrixkorrektur ist Aufgabe des Auftraggebers eine ausreichende Menge räumlich verteilter Zählwerte in ausreichender Differenzierung (Pkw, Lkw, ÖV, ggf. Rad) bereitzustellen. Es ist Aufgabe des Modellerstellers (Auftragnehmer), die Matrixkorrektur durchzuführen und die Qualität des Modells durch eine Validierung zu dokumentieren.

### Empfehlungen

- Beim Einsatz von Korrekturverfahren ist auszuweisen, wie groß der Einfluss der Korrektur ist (siehe hierzu Kapitel 8.7.3 und Abbildung 8-10).
- Der Nachweis sollte differenziert für Teilräume erfolgen. Zeigt sich, dass das Modell in einigen Teilräumen systematisch zu viel oder zu wenig Verkehr ermittelt, sollte zuerst das Nachfragemodell an diesen Stellen auf geeignete Weise korrigiert werden (Überprüfung der Strukturgrößen, Anpassung der Untersuchungsraumanteile, Anpassung der Zielwahlparameter). Die Korrektur der Zielwahlparameter kann dazu führen, dass gezählte Verkehrsstärken besser getroffen werden, wenn beobachtete Reiseweiten über- oder unterschätzt werden. In diesem Fall ist eine Anpassung der Reiseweiten innerhalb der Validierungsgrenzen sinnvoll.
- Für eine Matrixkorrektur wählt der Modellersteller (Auftragnehmer) nicht alle Zählstellen, sondern nur eine geeignete Menge von Zählstellen aus. So soll eine „Überanpassung“ des Modells vermieden werden, die die Prognosefähigkeit verringert. Die Validierung erfolgt aber über alle Zählstellen.
- Die bei einer Matrixkorrektur verwendeten Zählwerte sollten räumlich verteilt im Hauptstraßennetz liegen und eine besonders hohe Qualität aufweisen (keine Stundenzählungen, aktuelle Zählungen).
- Die im Analysefall verwendeten Korrekturverfahren werden in die Prognose übernommen, wenn davon auszugehen ist, dass die Korrekturfaktoren auch zum Prognosezeitpunkt Gültigkeit haben.
- Für die Ermittlung einer korrigierten Prognosematrix sollen die Differenz- und Faktormatrizen über den arithmetischem oder harmonischem Mittelwert kombiniert werden (siehe Abbildung 5-16).
- Eine Korrekturmatrix muss bei jeder Umlegung und Kenngrößenberechnung einbezogen werden, da sie die Routenwahl und die Reisezeiten beeinflussen kann.

### Optional

- Matrixkorrektur der externen Matrizen mit Zählwerten an der Grenze des Untersuchungsraums.

Tabelle 5-13: Hinweise und Empfehlungen zum Einsatz von Korrekturverfahren.

## 5.2 Planungsraum und Untersuchungsraum

Der Planungsraum umfasst den Raum, in dem Maßnahmen untersucht werden. Der Untersuchungsraum beinhaltet neben dem Planungsraum den Einflussraum, in dem die Maßnahmen Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage haben. Der Außenraum dient zur Abbildung der verkehrlichen Interaktion des Untersuchungsraums mit dem „Rest der Welt“. Abbildung 2-7 (in Kapitel 2.3.1) gibt einen Überblick über Planungsraum, Einflussraum, Untersuchungsraum und Außenraum.

In einem Verkehrsnachfragemodell wird die Binnenverkehrsnachfrage im Untersuchungsraum modelliert. Ortsveränderungen, die Quelle und / oder Ziel im Außenraum haben, müssen aus anderen Quellen, z.B. einem nationalen Modell zugespült werden. Bei diesen Ortsveränderungen sind Quelle, Ziel und Modus vorgegeben, so dass nur die Routenwahl modelliert werden kann.

### Hinweise und Empfehlungen zum Planungsraum und Untersuchungsraum

<p><b>Allgemein</b> <u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrszellen im Außenraum sollten nicht direkt an den Grenzen des Untersuchungsraums, sondern an ein vereinfachtes Verkehrsnetz im Außenraum angebunden werden.</li> </ul>
<p><b>Städtische / regionale Modelle</b> <u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Abgrenzung des Untersuchungsraums kann über die Pendlerströme erfolgen. Der Untersuchungsraum sollte so groß gewählt werden, dass etwa 70-80% der täglichen Pendlerbeziehungen (ohne Wochenendpendler), die im Planungsraum enden, ihre Quelle im Untersuchungsraum haben. Dabei sind auch grenzüberschreitende Pendlerbeziehungen zu berücksichtigen.</li> </ul>
<p><b>Großräumige / teilnationale Modelle</b> <u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei großräumigen / teilnationalen Modellen sollte der Untersuchungsraum so groß gewählt werden, dass etwa 90% der täglichen Pendlerbeziehungen, die im Planungsraum enden, ihre Quelle im Untersuchungsraum haben. Dabei sind auch grenzüberschreitende Pendlerbeziehungen zu berücksichtigen.</li> </ul>

Tabelle 5-14: Hinweise und Empfehlungen zum Planungsraum und Untersuchungsraum.

## 5.3 Abbildung Raum- und Siedlungsstruktur

In makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen werden Daten der Raum- und Siedlungsstruktur (Einwohner nach Alters- oder Personengruppen, Art und Größe von Aktivitätenorten) auf der Ebene von Verkehrszellen gespeichert. Sie sind Grundlage für die Ermittlung des Verkehrsaufkommens und repräsentieren die Start- und Zielorte von Ortveränderungen. Die Zahl und die Größe der Verkehrszellen hängen dabei von der Größe des Untersuchungsraums und vom Einsatzbereich ab. Typische städtische und regionale Verkehrsmodelle haben 500 bis 2.000 Verkehrszellen, großräumige und teilnationale Verkehrsmodelle können 10.000 und mehr Zellen haben. Bei teilnationalen Modellen sind Gemeinden und Stadtteile übliche Einheiten für Verkehrszellen. Eine Verkehrszelle repräsentiert dann im Mittel zwischen 5.000 und 20.000 Einwohner. Bei regionalen und städtischen Modellen sind Verkehrszellen auf der Ebene von Teilgemeinden, Stadtbezirken oder Baublöcken üblich, so dass auf eine Verkehrszelle 500 bis 5.000 Einwohner entfallen.

Die meisten Verkehrszelleneinteilungen orientieren sich an amtlich festgelegten Gebieten. Kleinräumige Zelleneinteilungen nutzen Baublöcke, Verkehrswege und natürliche Grenzen für die Abgrenzung von Zellen. Es gibt auch die Möglichkeit mit Rasterzellen (Kantenlänge zwischen 100 m und 1.000 m) zu

arbeiten, sofern die Daten hierfür zur Verfügung stehen. Bisher gibt es nur wenige Untersuchungen zu den Vor- und Nachteilen von Rasterzellen, z.B. Martinez et al. [87] oder Moeckel & Donnelly [89]. Vorteilhaft ist die einfache Handhabung. Nachteile können sich daraus ergeben, dass die Zahl der Zellen bei kleinen Kantenlängen sehr groß werden kann. In städtischen Gebieten mit einem dichten Verkehrsnetz werden die Rasterzellen die Verkehrswege schneiden, so dass hier Baublöcke eine bessere Abgrenzung ermöglichen.

Verkehrszellen können an einen oder mehrere Netzknoten bzw. Haltestellen angebunden werden. Eine Mehrfachanbindung ist dann erforderlich, wenn eine Zelle mehr als einen Siedlungsschwerpunkt umfasst, wenn es mehrere „Straßenausfahrten“ aus der Zelle oder mehrere Haltestellen im Umfeld der Zelle gibt. Bei mehr als einem angebundenen Knoten entscheidet das Umlegungsverfahren, über welchen Knoten die Verkehrsnachfrage eingespeist wird. Bei einigen Umlegungsverfahren gibt es die Möglichkeit, die Wahl der Knoten durch die Vorgabe von Anbindungsanteilen über sog. prozentuale Anbindungen festzulegen. Die Umlegungsverfahren splitten dann entweder die Nachfragematrix während der Umlegung in eine Zelle pro Anbindungsknoten auf oder arbeiten mit Widerstandszuschlägen. Aus Sicht der Modelltheorie stellen derartige Aufteilungsvorgaben potenzielle Schwachstellen im Modell dar, da Entscheidungen nicht modelliert, sondern vorgegeben werden. Bei der Abwägung zwischen der Zahl der Verkehrszellen und prozentualen Mehrfachanbindungen sollte deshalb geprüft werden, ob prozentuale Anbindungen nicht durch zusätzliche Verkehrszellen vermieden werden können. Die Nutzung von mehreren Anbindungen ohne vorgegebene Anteile erscheint dagegen unproblematisch, führt aber dazu, dass die Verkehrsteilnehmenden den für sie günstigsten Netzknoten auswählen.

Verkehrszellen stellen bei der Zielwahl die Menge der Alternativen dar, aus denen die Verkehrsteilnehmenden wählen können. Damit die Alternativen möglichst homogene Eigenschaften aufweisen, sind Verkehrszellen mit ähnlichen Größenordnungen bei den Einwohner- und Arbeitsplatzzahlen anzustreben. Die Größe der Verkehrszellen kann im Planungsraum kleiner sein als im Einflussraum, Sprünge in der Zellengröße zwischen Planungsraum und Einflussraum sollten jedoch vermieden werden.

Die Siedlungsstrukturdaten einer Verkehrszelle sind Grundlage für die Verkehrserzeugungsrechnungen. Alle relevanten Siedlungsstrukturdaten (z.B. Einwohner nach Personengruppen, Arbeitsplätze, Einkaufsgelegenheiten) sollten deshalb als Attribute bei den Verkehrszellen hinterlegt werden. Um die Transparenz bei den Siedlungsstrukturdaten zu erhöhen, können singuläre Verkehrserzeuger (z.B. Schulen, Einkaufsgelegenheiten, Freizeitgelegenheiten) als Point of Interest Objekte im Netzmodell abgebildet werden. Die Daten dieser Objekte werden dann vor der Verkehrserzeugungsrechnung der Zelle zugeordnet, in der die Objekte liegen. Bei der Verwaltung der Siedlungsstrukturdaten sollten die Anforderungen der Prognose berücksichtigt werden.

## Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung von Raum- und Siedlungsstruktur

### Allgemein

#### Hinweise

- Die Zahl der Zellen beeinflusst die Rechenzeit, insbesondere bei der Umlegung. Bei Modellen mit mehr als 1.000 Zellen können die Rechenzeiten für einen kompletten Modelldurchlauf eine Berechnung über Nacht erfordern.
- Bei der Nutzung prozentualer Anbindungen sollte geprüft werden, ob die verwendete Software dafür ein einheitliches Konzept für alle Umlegungsverfahren (IV, ÖV) anbietet und ob das auch die Kenngrößenmittlung einbezieht.
- Bei der Nutzung prozentualer Anbindungen müssen die Anteile in der Prognose dann manuell angepasst werden, wenn sich die Siedlungsschwerpunkte in einer Zelle verändern.
- Weitere Hinweise zur Generierung von Anbindungen finden sich in Galster [69].
- Die verfügbaren Standortdaten müssen mit der gewünschten Nachfragegruppierung abgestimmt sein, Es nützt nichts, eine feine Gruppierung zu haben, ohne über die erforderlichen Daten zu verfügen.

#### Empfehlungen

- Die Abgrenzung der Zellen sollte sich an den verfügbaren Siedlungsstrukturdaten orientieren. Außerdem sollen organisatorische Raumeinheiten (Gemeindegrenzen, Stadtteile), natürliche Grenzen (Flüsse) und trennende Verkehrswege (Autobahnen, Schienenwege) berücksichtigt werden.
- Verkehrszellen sollen im gesamten Untersuchungsraum ähnliche Größenordnungen bei den Einwohner- und Arbeitsplatzzahlen haben. Verkehrszellen können mit zunehmender Entfernung vom Planungsraum nach außen größer werden. Sprünge in der Zellengröße zwischen Planungsraum und Einflussraum sollten vermieden werden.
- Für jede Verkehrszelle sollte neben den Zellgrenzen die Siedlungsflächen als Polygonobjekte eingepflegt werden.
- Für Flächen, die im Prognosezeitraum entwickelt werden sollen, sind bereits im Analysefall Verkehrszellen vorzusehen.
- Im Planungsraum sollte die Einspeisung nicht direkt in das Hauptstraßennetz erfolgen.

### Städtische / regionale Modelle

#### Empfehlungen

- Zellenanzahl: 500 bis 2.000.
- Zellengröße im Planungsraum:  
Siedlungsfläche < 0,5 km<sup>2</sup>,  
Einwohnerzahl < 2.000,  
größte Zelle (Einwohnerzahl + Arbeitsplatzzahl) < 2 x Mittelwert aller Zellen (Einwohnerzahl + Arbeitsplatzzahl).
- Mindestens eine Zelle für jeden Bahnhof (Fernbahn, Regionalbahn, Stadtbahn).
- IV-Anbindungen: Die Anbindungsknoten sollten im Planungsraum innerhalb der Siedlungsfläche liegen. Jeder Siedlungsschwerpunkt soll angebunden werden.
- ÖV-Anbindungen: Es sollten alle Haltestellen in der Zelle angebunden werden und zusätzlich alle Haltestellen, deren Haltestelleneinzugsbereich das Zellenpolygon schneidet.

#### Optional

- Singuläre Verkehrserzeuger als Point of Interest Objekte abbilden.
- Zellen im Planungsraum auf Baublockebene.
- Eine Zelle für jeden Siedlungsschwerpunkt, so dass im IV eine Anbindung pro Zelle ausreichend ist.
- Kleinere Zellengrößen, wenn eine Modellierung des Radverkehrs oder Fußverkehrs vorgesehen ist. Laut dem SVI-Forschungsauftrag 2014/001 „Makroskopische Modellierung des Fuß- und Veloverkehrs“ [70] sind Zellen mit einer Seitenlänge von etwa 400 m für den Radverkehr empfehlenswert. Für den Fußverkehr werden Seitenlängen von durchschnittlich 200 m bzw. hektargroße Zellen empfohlen.

### Großräumige / teilnationale Modelle

#### Empfehlungen

- Zellenanzahl: 2.000 bis über 10.000.
- Zellengröße im Planungsraum:  
nicht größer als eine Gemeinde.
- Mindestens eine Zelle für jeden Bahnhof (Fernbahn, Regionalbahn).
- IV-Anbindungen: Die Anbindungsknoten sollten in der Verkehrszelle liegen. Siedlungsschwerpunkte sollen angebunden werden.
- ÖV-Anbindungen: Haltestellen des ÖV, die außerhalb der Verkehrszelle liegen, sollten dann angebunden werden, wenn sie höherrangig als die Haltestellen in der Zelle sind und ihr Haltestelleneinzugsbereich das Zellenpolygon schneidet.

#### Optional

- Große singuläre Verkehrserzeuger (Flughäfen, große Arbeitgeber, Hochschulen, Freizeitparks) als Point of Interest Objekte oder als eigene Zellen abbilden.
- Verkehrszellen als Rasterzellen.

Tabelle 5-15: Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur.

## 5.4 Abbildung des Verkehrsangebots

Das Verkehrsangebot bietet den Verkehrsteilnehmenden Beförderungsmöglichkeiten mit Verkehrsmitteln in Form von Routen oder tageszeitabhängigen Verbindungen. Die Menge der Beförderungsmöglichkeiten wird im Verkehrsnachfragemodell ermittelt. Jede Beförderungsmöglichkeit wird durch Attribute (u.a. Modus, Reisezeit, Kosten, Umsteigehäufigkeit) beschrieben. Dazu wird das Verkehrsangebot in einem sog. Netzmodell, das Teil des Nachfragemodells ist, abgebildet.

### 5.4.1 Verkehrsmittel und Verkehrsmodi

Die Menge der im Netzmodell abgebildeten Verkehrsmittel und Modi (= Menge von Verkehrsmitteln) bestimmt die Menge der Beförderungsmöglichkeiten, die den Verkehrsteilnehmenden zur Verfügung stehen. Modi, für die mit einer Umlegung die Verkehrsstärke im Netz ermittelt werden soll, müssen im Netzmodell mit dem zugehörigen Verkehrswegenetz kodiert werden. Für Modi, die nicht umgelegt werden sollen, kann eine vereinfachte Ermittlung der Reisezeiten über die Luftlinien- oder Straßennetzentfernung und typische Geschwindigkeiten erfolgen.

- Ein großräumiges Nachfragemodell wird in der Regel die Modi Pkw und ÖV-Schiene abbilden, bei Bedarf auch den Modus Flugzeug. Speziell für den Wirtschaftsverkehr wird mindestens ein Modus für den Straßengüterverkehr mit einer Fahrzeugklasse Lkw und ein Modus Schiene abgebildet. Optional können weitere gewichtsabhängige Fahrzeugklassen ( $< 7,5\text{ t}$ ,  $< 12\text{ t}$ ,  $\geq 12\text{ t}$ ) differenziert werden, um beispielsweise Straßenbenutzungsgebühren abzubilden. Lieferwagen werden der Fahrzeugklasse Pkw zugeordnet. Die Abbildung weiterer Modi (z.B. Schifffahrt) hängt vom Einsatzbereich des Verkehrsnachfragemodells ab.
- Ein regionales Modell sollte mindestens die Modi Pkw, ÖV, Rad und Fuß unterscheiden. Der Modus Pkw umfasst dabei auch andere Verkehrsmittel des Leichtverkehrs (Krafträder). Speziell für den Wirtschaftsverkehr wird mindestens ein Modus für den Straßengüterverkehr mit einer Fahrzeugklasse Lkw abgebildet, die optional in weitere Fahrzeugklassen (z.B. Lkw nach Gewichtsklasse ( $< 7,5\text{ t}$ ,  $< 12\text{ t}$ ,  $\geq 12\text{ t}$ )) differenziert werden kann.

Die Aufteilung des Modus Pkw in Pkw-Selbstfahrer und Pkw-Mitfahrer ermöglicht eine bessere Berücksichtigung der Führerscheinverfügbarkeit. Außerdem müssen dann Personenfahrten nicht in Fahrzeugfahren umgerechnet werden. Der Modus Pkw-Mitfahrer ist jedoch nur eingeschränkt geeignet, Wirkungen von Ridesharing abzubilden, da sich Pkw-Mitfahrer in der Regel auf Familienmitglieder oder Bekannte beziehen. Um Ridesharing abzubilden, ist ein eigener Sharingmodus mit differenzierten Preisen sinnvoller.

### 5.4.2 Straßennetz

Die Bedeutung einer Straße ergibt sich aus der Funktion der Straße im Netzzusammenhang. Da sich die Funktion einer Straße nicht immer ausreichend aus dem Baulasträger (Bundesstraßen, Landesstraßen, Gemeindestraßen) oder aus dem Ausbauzustand ableiten lassen, nutzen Datenmodelle den Begriff der Straßenfunktionsklasse (Functional Road Class). Das Netzmodell sollte im Untersuchungsraum immer mindestens eine Straßenfunktionsklasse mehr abbilden als das Netz, das Gegenstand der Planung ist. Außerhalb des Untersuchungsraums soll das Netzmodell überregionale Verkehrswege umfassen, wenn diese Verkehrswege Teil einer Alternativroute sind, die vom Durchgangsverkehr des Untersuchungsraums genutzt werden kann. Soll das Modell für die Planung von Radwegenetzen eingesetzt werden, müssen folglich alle für den Radverkehr geeigneten Strecken in das Netzmodell integriert werden. Straßen mit Radverkehrsanlagen müssen durch geeignete Attribute gekennzeichnet werden.

Die Knoten und Strecken eines Straßennetzes können mit einem einfachen oder komplexen Netzmodell abgebildet werden:

- Einfache Netzmodelle:  
Richtungsfahrbahnen von Straßen werden zusammengefasst und als eine Kante mit Hin- und Rückrichtung dargestellt. Alle Knotenpunkte im Verkehrsnetz werden durch einen Modellknoten abgebildet. Rampenstrecken sind nicht oder nur bei Hochleistungsstraßen im Netzmodell enthalten.
- Komplexe Netzmodelle:  
Komplexe Netzmodelle sind so konzipiert, dass sie für Navigationszwecke genutzt werden können. Deshalb werden bei Straßen mit getrennten Richtungsfahrbahnen die Hin- und Rückrichtung als räumlich getrennte Kanten modelliert. Große Knotenpunkte werden in Teilknoten unterteilt und planfreie Knoten werden mit ihren Rampen abgebildet.

Für die Zwecke der Verkehrsnachfragemodellierung bieten einfache Netzmodelle Vorteile, da sie eine einfachere Abbildung von Knotenpunkten, Haltestellen und Radwegen ermöglichen. Sie benötigen außerdem weniger Rechenzeit und Speicherplatz. Da Fahrtzeitmessungen meist nur auf Navigationsnetzen verfügbar sind, kann für die Validierung von Fahrtzeiten ein Netzmatching erforderlich sein. Komplexe Netzmodelle erfordern für die Abbildung von Knotenwiderständen besondere Lösungen, bei denen die Teilknoten zu einem Hauptknoten aggregiert werden. Auch für die Lärmberechnung, die Verkehrsstärken aus Hin- und Rückrichtung benötigt, sind bei komplexen Netzen zusätzliche Attribute erforderlich, die die Hin- und Rückrichtung miteinander verknüpfen.

Strecken sollten aufgrund ihrer verkehrstechnischen Eigenschaften typisiert werden. Die Straßenklasse nach Straßenrecht (Bundesautobahn, Bundesstraße, ...) sollte als zusätzliches Attribut vorgesehen werden.

Zeitaufwände an Knoten, die sich aus der Art der Steuerung ergeben (z.B. Grundwartezeit einer Lichtsignalanlage) oder aufgrund von Kapazitätsbegrenzungen (Reststauwartezeit) können in Verkehrsnachfragemodellen durch konstante oder auslastungsabhängige Abbiegewiderstände nachgebildet werden. Abbiegewiderstände beeinflussen die Routenwahl und sind deshalb für die Abbildung der Routenwahl in engmaschigen Netzen erforderlich. Deshalb sollten in engmaschigen

Netzen mindestens konstante Abbiegewiderstände vorgesehen werden. Soll das Modell zur Ermittlung von Verkehrsstärken für die Bemessung von Knotenpunkten verwendet werden, müssen Abbiegewiderstände kapazitätsabhängig ermittelt werden. Das erfordert die Angabe von Fahrstreifenzahl, Fahrstreifenaufweitungen und Grünzeitanteilen.

Die Eigenschaften der Straße müssen durch geeignete Attribute (Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss differenziert nach Pkw und Lkw, Stundenkapazität, Tageskapazität, ggf. Steigung und Menge der zugelassenen Verkehrsmittel) beschrieben werden. Insbesondere die Kapazitäten sind in den Datenquellen für Verkehrsnetze nicht enthalten und müssen gesetzt werden. Hinweise zu den Tageskapazitäten finden sich bei der IV-Umlegung in Kapitel 5.1.8.1.

<b>Straßenfunktionsklasse</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Verbindungsfunktionsstufe nach RIN [51]</b>
0	Fernstraßen zur Verbindung von Metropolregionen (i.d.R. Autobahnen)	0 oder I
1	Fernstraßen zur Verbindung von Oberzentren	I
2	Überregionale Straßen zur Verbindung von Mittelzentren	II
3	Regionale Straßen zur Verbindung von Unterzentren	III
4	Nahräumige Straßen zur Verbindung von Orten ohne Zentralität	IV
5	innerörtliche Hauptsammelstraßen	III oder IV
6	innerörtliche Sammelstraßen	IV
7	innerörtliche Anliegerstraßen	V
>7	Forstwege, Radfahrstraßen, Fußwege	-

Tabelle 5-16: Unterteilung von Straßen in Straßenfunktionsklassen.

### 5.4.3 ÖV-Angebot

Das ÖV-Angebot wird durch eine Menge von Haltestellen und Linien abgebildet. Eine Linie umfasst den Linienweg, die Fahrtzeiten zwischen den Haltestellen und das Fahrtenangebot. Das Fahrtenangebot kann vereinfacht durch die Angabe eines Taktes oder durch die genauen Abfahrtszeiten beschrieben werden. Bei der Übernahme der ÖV-Daten aus einem Fahrplanauskunftssystem muss ein repräsentativer Tag für den Fahrplan ausgewählt werden.

Ein städtisches / regionales Verkehrsnachfragemodell sollte im Untersuchungsraum das komplette ÖV-Angebot eines typischen Werktages abbilden. Beim Fahrplan kann die Angabe eines Taktes genügen, da in Städten die Fahrzeugfolgezeiten kurz sind und Umsteigewartezeiten deshalb geringere Bedeutung haben. Verkehrszellen können direkt an die Haltestellen oder für die Zwecke der Haltestellenplanung an das Fußwegenetz angebunden werden.

In einem großräumigen / teilnationalem Modell genügt es, das Angebot im Bahnverkehr (ohne U-Bahn und Tram) und ggf. im Fernbusverkehr abzubilden. Liegt in einer Verkehrszelle kein Bahnhof, kann die Anbindung mit mittleren Fahrtzeiten des lokalen ÖV ohne Angabe von Linienwegen erfolgen.

Das ÖV-Angebot kann in einem eigenen Netzmodell oder in einem integrierten Netzmodell gehalten werden. Für die Darstellung in Karten und für einen Abgleich von Pkw-Fahrtzeiten und Bus-Fahrtzeiten ist ein integriertes Netzmodell vorteilhaft. Das straßengebundene ÖV-Angebot lässt sich in komplexe Netzmodelle nur dann gut integrieren, wenn die Haltestellen in Haltepunkte aufgelöst werden.

Park+Ride Haltestellen sind durch ein geeignetes Attribut zu kennzeichnen. Je nach Aufgabenstellung kann es sinnvoll sein, die Stellplatzkapazitäten an Park+Ride Haltestellen zu hinterlegen.

#### **5.4.4 Nutzungsgebühren und Fahrtkosten**

Verkehrsnachfragemodelle, die die Wirkungen von monetären Maßnahmen abbilden sollen, müssen für jede Beförderungsmöglichkeit Preise ermitteln. Dazu müssen Straßenbenutzungsgebühren, Parkgebühren, IV-Fahrtkosten und ÖV-Fahrpreise im Netzmodell abgebildet werden.

- Entfernungsabhängige Straßenbenutzungsgebühren oder Durchfahrtsgebühren für eine Einzelstrecke können direkt an der Strecke hinterlegt werden.
- Gebietsbezogene Einfahrtsgebühren können über Kosten auf Abbiegern in das Gebiet kodiert werden.
- Parkgebühren können als Attribute einer Verkehrszelle kodiert werden. Die Gebühren können dabei nach Wegezweck differenziert werden.
- ÖV-Fahrpreise erfordern die Abbildung des Tarifsystems mit Fahrkartenarten (Einzelticket, Zeitkarte) basierend auf Entfernungen oder Zonen in einem Tarifmodell.
- Kostensätze für Kraftstoffe und elektrische Energie (€/Liter oder €/kWh) sind ein globaler Parameter. Aus den spezifischen Verbrauchswerte (Liter/km oder kWh/km) der Fahrzeuge ergeben sich dann die Fahrtkosten im IV. Der Verbrauch kann von der Fahrzeugflotte und der Streckencharakteristik (Steigung, zulässige Geschwindigkeit, Art der Knotensteuerung) abhängen.

## Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung des Verkehrsangebots

### Allgemein

#### Hinweise

- Eine Netzkategorisierung mit Straßenfunktionsklassen oder nach den RIN [51] hilft bei der Festlegung des relevanten Straßennetzes.
- Straßen im nachgeordneten Netz sollen vom Lkw-Durchgangsverkehr auch dann nicht genutzt werden, wenn im übergeordneten Straßennetz Maßnahmen mit Geschwindigkeitsreduktionen eingeführt werden. Deshalb sollten die Streckenwiderstände für Lkw im nachgeordneten Netz bereits im Analysefall durch ein geeignetes Streckenattribut erhöht werden.
- Die Geschwindigkeit einer Strecke im unbelasteten Netz sollte der typischerweise bei freiem Verkehrsfluss gefahrenen Geschwindigkeit entsprechen. Sie kann von der zulässigen Geschwindigkeit abweichen (z.B. Lkw auf Autobahnen und Landstraßen).
- Bei der Attribuierung der Geschwindigkeiten ist zwischen Realitätsnähe und planerischer Handhabbarkeit abzuwägen. Aus planerischer Sicht sollten die Geschwindigkeiten eines Netzes typischerweise gefahrene Geschwindigkeiten im unbelasteten Netz abbilden. Die räumliche Differenzierung der Geschwindigkeiten sollte nicht zu kleinteilig sein.
- Bei Nutzung beobachteter Geschwindigkeiten ist die Prognosefähigkeit nicht gewährleistet, da die Geschwindigkeiten z.B. vom Lkw-Anteil und Überholmöglichkeiten abhängen.
- Kosten für Parken, Straßennutzung und Kraftstoffe beeinflussen die Moduswahl. Insbesondere wenn Wirkungen monetärer Maßnahmen untersucht werden sollen, müssen die Kosten im Verkehrsangebot abgebildet werden.

#### Empfehlungen

- Für die Beschreibung des Verkehrsangebots der Straße sind die technischen Eigenschaften (zul. Geschwindigkeit, Anzahl Fahrstreifen, Kapazität) von zentraler Bedeutung. Eine Strecke sollte deshalb durch zwei Attribute Straßenklasse und Streckentyp typisiert werden: (1) Die Straßenklasse nach Straßenrecht (Bundesautobahn, Bundesstraße, ...) und (2) der Streckentyp aufgrund der technischen Eigenschaften.
- Bei Verkehrsnachfragemodellen, mit denen sowohl Stundenumlegungen als auch Tagesumlegungen durchgeführt werden, sollten Stundenkapazitäten und Tageskapazitäten hinterlegt werden. Die Abbildung der zwei Kapazitäten kann auch über einen Parameter der CR-Funktion (siehe Kapitel 5.1.8.1) erreicht werden.
- Bei Untersuchung monetären Maßnahmen müssen Nutzungsgebühren (IV und ÖV) und Kraftstoffkosten im Verkehrsangebot abgebildet werden.
- Straßen im nachgeordneten Netz müssen mit zusätzlichen Streckenwiderständen für den Lkw-Verkehr versorgt werden, um Lkw-Durchgangsverkehr realitätsnah im übergeordneten Straßennetz zu halten.
- Außerhalb des Untersuchungsraums soll das Netzmodell überregionale Verkehrswege umfassen, wenn diese Verkehrswege Teil einer Alternativroute sind, die vom Durchgangsverkehr des Untersuchungsraums genutzt werden kann.

### Städtische / regionale Modelle

#### Empfehlungen

- Modi Personenverkehr: Pkw, ÖV Schiene & Straße, Rad, Fuß
- Modi Güterverkehr: Lkw nicht differenziert.
- Straßennetz: einfache Abbildung ohne komplexe Knoten, mindestens alle Straßen bis zur Straßenfunktionsklasse 6 und alle vom ÖV befahrenen Straßen.
- Knotenwiderstände: kapazitäts- und steuerungsabhängige Abbiegezeiten.
- ÖV-Angebot: alle ÖV-Verkehrsmittel, Fahrplan eines typischen Werktags.
- Integriertes Netzmodell Straße und ÖV, zumindest im Planungsraum.

#### Optional

- Modi Personenverkehr: Pkw-Mitfahrer.
- Modi Güterverkehr: Lkw differenziert, um Maut abzubilden.
- Radwegenetz.
- Fußwege zur ÖV-Haltestelle.
- Nutzungsgebühren.

### Großräumige / teilnationale Modelle

#### Empfehlungen

- Modi Personenverkehr: Pkw, ÖV Schiene.
- Modi Güterverkehr: Lkw nicht differenziert, Schiene.
- Straßennetz: einfache Abbildung ohne komplexe Knoten, mindestens alle Straßen bis zur Straßenfunktionsklasse 4.
- ÖV-Angebot: alle ÖV-Schiene, Fahrplan eines typischen Werktags zu Schulzeiten.

#### Optional

- Modi Personenverkehr: Pkw-Mitfahrer, Flugzeug und Fernbus.
- Modi Güterverkehr: Lkw differenziert, um Maut abzubilden.
- Integriertes Netzmodell Straße und ÖV.
- Knotenwiderstände.
- Nutzungsgebühren.

Tabelle 5-17: Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung des Verkehrsangebots.

### 5.4.5 Kenngrößenmatrizen

Eine Kenngrößenmatrix enthält die Kennwerte einer Kenngröße, die den Aufwand für eine Ortsveränderung zwischen Verkehrszellen quantifizieren. Typische Aufwände sind Zeiten, Kosten und Umsteigehäufigkeiten. Kenngrößenmatrizen beschreiben so die Qualität eines Verkehrsangebots. Bei der Berechnung der Kenngrößenmatrizen sind folgende Aspekte zu beachten:

- Kenngrößen des Zellbinnenverkehrs (Hauptdiagonale der Matrix):  
Ortsveränderungen innerhalb einer Zelle (Zellbinnenverkehr) werden in makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen nicht umgelegt. Deshalb können Kenngrößen für Ortsveränderungen innerhalb einer Zelle vom Modell nicht direkt berechnet werden. Stattdessen wird ein Wert gesetzt, der einer mittleren Ortsveränderung innerhalb der Zelle entspricht. Dieser Wert kann mit mehreren Methoden geschätzt werden. Abbildung 5-18 zeigt zwei mögliche Ansätze.

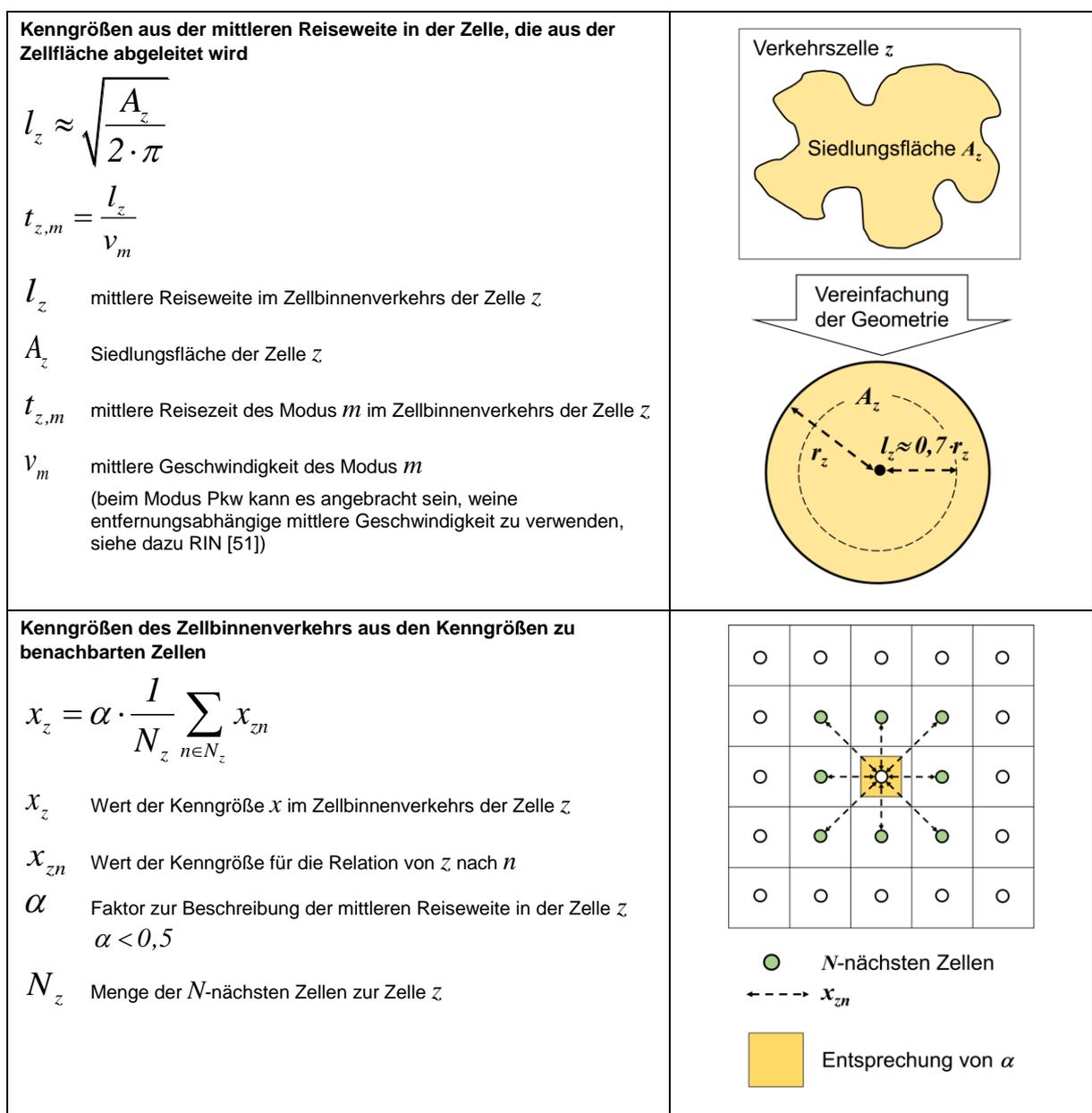


Abbildung 5-18: Methoden zur Ermittlung der Kenngrößenwerte im Zellbinnenverkehr.

- **Zeitpunkt der Kenngrößenberechnung:**  
Eine Eigenschaft des iterativen Abarbeitens der Modellstufen ist, dass sich die Kenngrößen nach jeder Umlegung durch veränderte Streckenbelastungen ebenfalls ändern. Um das Modell einerseits transparent und reproduzierbar und andererseits möglichst wirklichkeitstreu zu machen, sollten die Kenngrößenmatrizen deshalb für zwei Zeitpunkte ausgewiesen werden:
  - Kenngrößen, die als Eingangsgrößen für die Nachfrageberechnung genutzt werden und für die Reproduktion der Ergebnisse notwendig sind.
  - Kenngrößen nach der finalen Umlegung. Diese Kenngrößen sind mit den tatsächlichen Widerständen der Strecken bzw. der gewählten Fahrtrouten konsistent, d.h. die Multiplikation der Nachfragematrix mit der Reiseweiten- bzw. Reisezeitmatrix ergibt die gleichen Werte wie die Aufsummierung der Verkehrsleistung oder des Verkehrszeitaufwands über alle Netzelemente (Strecken, Anbindungen, Abbieger, Linienwege). Diese Kenngrößenberechnung ist für die Ermittlung der Kenngrößen nach Tabelle 10-1 erforderlich.
- **Kenngrößen für die Modellierung und für die Planung:**  
Für die Nachbildung von Entscheidungen mit Entscheidungsmodellen können andere Kenngrößen erforderlich sein als für die Zwecke der Verkehrsplanung. Die Entscheidungsmodellierung wird den Zeitaufwand nach Gehzeiten, Wartezeiten und Fahrtzeiten differenzieren. Für die Verkehrsplanung wird die gesamte Reisezeit oder für Bewertungen nach den RIN [51] die Luftliniengeschwindigkeit von Bedeutung sein. Eine Modellimplementierung sollte beide Arten von Kenngrößen bereitstellen.
- **Kenngrößen für verschiedene Zeiträume:**  
Für Verkehrsnachfragemodelle, die verschiedene Zeiträume abbilden, ist es ggf. erforderlich Kenngrößen für mehrere Tageszeiten getrennt zu berechnen.
- **Symmetrisierung der Kenngrößenwerte:**  
Die Kenngrößenwerte der Hin- und Gegenrichtung können sich im unbelasteten Netz unterscheiden, da das Verkehrsangebot nicht immer identisch ist. Diese – meist kleinen – Abweichungen werden von den Verkehrsteilnehmenden nicht bewusst wahrgenommen. Deshalb kann es bei mittleren Kenngrößen eines Tages sinnvoll sein, die Werte der Hin- und Gegenrichtung zu mitteln (= Symmetrisierung der Kenngrößenwerte). Immer dann, wenn tageszeitabhängige Werte von Bedeutung sind, ist eine Mittelwertbildung nicht zweckmäßig, da die Angebotsqualität von der Lastrichtung abhängt.

## Hinweise und Empfehlungen zu Kenngrößenmatrizen

### Empfehlungen

- Kenngrößen für Ortsveränderungen innerhalb einer Zelle sollen einer mittleren Ortsveränderung innerhalb der Zellenausdehnung entsprechen.
- Die Kenngrößen sollen für zwei Modellzustände ausgewiesen werden: (1) Kenngrößen, die zur Berechnung / Reproduktion des Nachfragemodells notwendig sind und (2) Kenngrößen, die die Widerstände nach der finalen Umlegung wiedergeben.

### Optional

- Berechnung der Kenngrößen für verschiedene Tageszeiten

Tabelle 5-18: Hinweise und Empfehlungen zur Berechnung der Kenngrößenmatrizen

## 5.5 Abbildung der Verkehrsnachfrage

### 5.5.1 Personenverkehr

Die Ausprägungen einer Ortsveränderung (Entfernung des Ziels, Abfahrtszeitpunkt, gewählter Modus) werden im Personenverkehr maßgeblich von Eigenschaften der Person (z.B. Notwendigkeit zur Teilnahme an gewissen Aktivitäten, Verfügbarkeit Pkw und ÖV-Zeitkarte) und dem Wegezweck bestimmt. Bei makroskopischen Modellen ist es deshalb üblich, die Verkehrsnachfrage mindestens nach Wegezwecken zu segmentieren. Eine weitere Segmentierung in verhaltenshomogene Personengruppen kann die Transparenz und die Aussagekraft des Modells erhöhen. Das Mobilitätsverhalten zum Prognosezeitpunkt kann sich dadurch verändern, dass sich die Bevölkerungszusammensetzung ändert, so kann z.B. der Anteil der jungen Bevölkerung, die über keinen Pkw verfügt, zwischen Analyse- und Prognosezeitpunkt abnehmen. Steigt der Anteil der Bevölkerung im Rentenalter, kann der Anteil des Wegezwecks „Freizeit, private Erledigung“ zunehmen. Die Nutzung von Personengruppen ermöglicht damit, über eine Prognose der Bevölkerungszusammensetzung, zukünftiges Verhalten im Modell zu berücksichtigen. Tabelle 5-19 zeigt mögliche Segmentierungen für Wegezwecke, Tabelle 5-20 für Personengruppen.

In den einzelnen Modellstufen können unterschiedliche Segmentierungen sinnvoll oder erforderlich sein:

- Verkehrserzeugung: Die Mobilitätsraten für einen Wegezweck (z.B. Einkaufen) sind von der Personengruppe abhängig. Deshalb soll die Segmentierung Personengruppen und Zwecke umfassen.
- Verkehrsverteilung: Die Wahl des Aktivitätenortes und die Bereitschaft, für die Durchführung einer Aktivität einen gewissen Aufwand in Kauf zu nehmen, hängt von der Art der Aktivität ab. Deshalb ist mindestens eine Segmentierung nach Zwecken erforderlich.
- Moduswahl: Die Moduswahl wird maßgeblich von der Verfügbarkeit eines Pkw oder einer ÖV-Zeitkarte beeinflusst. Die Verfügbarkeit kann entweder durch die Segmentierungen in Personengruppen oder durch zellenspezifische Attribute abgebildet werden. Für die Zielwahl- und die Moduswahl sollte die gleiche Segmentierung gewählt werden.
- Abfahrtszeitwahl: Für jeden Aktivitätenübergang (z.B. Wohnen – Arbeiten oder Arbeiten – Einkaufen) können spezifische Tageszeitganglinien hinterlegt werden.
- Umlegung: Für die Umlegung werden die Nachfragematrizen der einzelnen Segmente häufig zusammengefasst. In speziellen Anwendungsfällen kann es sinnvoll sein, spezifische Eigenschaften einer Route durch eine Segmentierung bei der Routenwahl zu berücksichtigen. Dazu gehören Kosten und die Umsteigehäufigkeit.

Weitere Eigenschaften des Mobilitätsverhaltens, die sich aus dem Wohnort ergeben (Stadt, Land) können bei der Nachfragemodellierung entweder durch eine weitere Segmentierung der Nachfrage oder durch zellen- und relationspezifische Variablen in der Nutzenfunktion berücksichtigt werden. Hierzu bietet es sich an, Verkehrszellen nach Raumtyp zu unterscheiden. Die Regionalstatistische

Raumtypologie (RegioStaR)<sup>10</sup> [104] gibt verschiedene Klassierungsmöglichkeiten nach Raumtypen vor, z.B. RegioStaR 2 mit einer Unterscheidung zwischen Stadtregion und ländlicher Region.

Wege Zwecke Segmentierung 1	Wege Zwecke Segmentierung 2
Wohnen	Wohnen
Arbeiten	Arbeit qualifiziert
	Arbeit einfach
	Arbeit selbständig
	Arbeit Teilzeit
Ausbildung	Kindergarten, Vorschule
	Ausbildung Grundschule
	Ausbildung weiterführende Schule
	Ausbildung Berufsschule
	Ausbildung Hochschule
Einkaufen	Einkaufen täglicher Bedarf
	Einkaufen sonstige Waren
Freizeit, private Erledigung	private Erledigung (Arzt, Bank, Post)
	Freizeit (Besuche)
	Freizeit (Restaurant, Kultur)
	Freizeit (Sport, Grünanlagen)
	Freizeit (Tagesausflug)
Sonstige	Rundwege
	Bringen / Holen

Tabelle 5-19: Beispiele für eine Segmentierung von Wege Zwecken.

Personengruppen Segmentierung 1	Personengruppen Segmentierung 2	Segmentierung nach Pkw- und Zeitkartenverfügbarkeit
Kinder	Kinder	
Personen in der Ausbildung	Grundschüler	
	Schüler	
	Azubi	
	Studenten	<input checked="" type="checkbox"/>
Erwerbstätige	Angestellte qualifiziert	<input checked="" type="checkbox"/>
	Angestellte einfach	<input checked="" type="checkbox"/>
	Selbständige und freiberuflich Tätige	<input checked="" type="checkbox"/>
	Teilzeitbeschäftigte	<input checked="" type="checkbox"/>
Nicht Erwerbstätige	Arbeitslose	<input checked="" type="checkbox"/>
	Hausmann / -frau	<input checked="" type="checkbox"/>
Rentner	Rentner ≤ 75	<input checked="" type="checkbox"/>
	Rentner > 75	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabelle 5-20: Beispiele für eine Segmentierung von Personengruppen.

<sup>10</sup> <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/regionalstatistische-raumtypologie.html>

## Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung der Verkehrsnachfrage

<p><b>Allgemein</b></p> <p><u>Hinweise</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Für jede Nachfragegruppe müssen für jede Modellstufe Parameter gesetzt oder unter Nutzung von Daten aus Mobilitätserhebungen geschätzt werden. Für eine Schätzung müssen für jedes Segment eine ausreichende Menge an Datensätzen zur Verfügung stehen. Das ist bei der Segmentierung der Nachfrage bzw. beim Design einer Mobilitätserhebung zu beachten.</li> </ul>
<p><b>Städtische / regionale Modelle</b></p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindestens folgende Wegezwecke: Wohnen, Arbeit, Ausbildung Schule, Ausbildung Hochschule, Einkaufen täglicher Bedarf, Einkaufen sonstiger Bedarf, Freizeit, Sonstiges.</li> <li>• Verfügbarkeit Pkw und ÖV-Zeitkarte über Personengruppe oder Zellenattribut.</li> <li>• Verkehrserzeugung: Differenzierung von Personengruppen, um die Prognosefähigkeit zu gewährleisten.</li> <li>• Ziel- und Moduswahl: Differenzierung mindestens nach Wegezweck.</li> <li>• Umlegung: hier genügt eine Nachfragematrix je Modus.</li> </ul> <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Personengruppen,</li> <li>• Weitere Wegezwecke aus Tabelle 5-19,</li> <li>• Differenzierung von Personengruppen oder Wegezwecken nach Raumtyp,</li> <li>• Bei fehlenden Daten: Mobilitätserhebung.</li> </ul>
<p><b>Großräumige / teilnationale Modelle</b></p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindestens folgende Wegezwecke: Wohnen, Arbeit, Ausbildung, Einkaufen, Freizeit, Sonstiges.</li> <li>• Verfügbarkeit Pkw und ÖV-Zeitkarte über Personengruppe oder Zellenattribut.</li> <li>• Differenzierung nach Raumtyp.</li> <li>• Verkehrserzeugung: Differenzierung mindestens nach Wegezweck und Raumtyp.</li> <li>• Ziel- und Moduswahl: Differenzierung mindestens nach Wegezweck und Raumtyp.</li> <li>• Umlegung: hier genügt eine Nachfragematrix je Modus.</li> </ul> <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Personengruppen,</li> <li>• Weitere Wegezwecke aus Tabelle 5-19,</li> <li>• bei fehlenden Daten: Mobilitätserhebung.</li> </ul>

Tabelle 5-21: Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung der Verkehrsnachfrage im Personenverkehr.

### 5.5.2 Wirtschaftsverkehr

Der Wirtschaftsverkehr wartet im Gegensatz zum Personenverkehr mit einer größeren Komplexität hinsichtlich der Modellierungsweisen auf. Grund sind komplexere Aufgabenstellungen im Wirtschaftsverkehr und fehlende Datengrundlagen. Empfehlungen zum Wirtschaftsverkehr können deshalb nicht im gleichen Maße wie zum Personenverkehr gegeben werden.

Wirtschaftsverkehr beinhaltet den Personenwirtschaftsverkehr, der sich aus Dienstreise- und Dienstleistungsverkehren zusammensetzt (siehe Lohse & Schnabel [111]). Die Fahrt eines Handwerksmeisters von seinem Betrieb zur Baustelle ist beispielsweise Teil des Personenwirtschaftsverkehrs. Die Fahrt eines Lkw-Fahrers zwischen Logistikzentrum und Ladengeschäft ist hingegen dem Güterwirtschaftsverkehr zuzurechnen. Zusammen mit dem Personenwirtschaftsverkehr bildet dieser den Wirtschaftsverkehr.

Eine einfachste Form den Wirtschaftsverkehr zu berücksichtigen, ist über die Integration des Personenwirtschaftsverkehrs in ein Personenverkehrsmodell und die Abbildung des Güterwirtschaftsverkehrs in einem eigenen Wirtschaftsverkehrsmodell mit nur einer Fahrzeugklasse für die Umlegung. Der Personenwirtschaftsverkehr wird über einen eigenen Wegezweck (z.B. Dienst) in

das Personenverkehrsmodell integriert. Im Güterwirtschaftsverkehr wird eine einzelne Fahrzeugklasse Lkw verwendet. Ein eigenständiges Modell für Güterwirtschaftsverkehr wird in Kapitel 2.2.3.2 erläutert. Über die Segmentierung des Güterwirtschaftsverkehr in Wirtschaftsverkehrssegmente können branchen- bzw. güterspezifisches Entscheidungsverhalten und entsprechende Siedlungsstrukturdaten verknüpft und ein differenziertes Güterwirtschaftsverkehrsgeschehen abgebildet werden. Branchenspezifische Zielwahlentscheidungen oder der Einsatz von Tourenfahrten können berücksichtigt werden. In der einfachsten Form wird mit nur einem Wirtschaftsverkehrssegment gerechnet.

<b>Klassifikation für Gutarten (Abteilungsebene nach NST-2007 [120])</b>	<b>Klassifikation für Wirtschaftszweige (Abschnittsebene nach WZ 2008 [121])</b>
Land- und Forstwirtschaft / Fischerei	Land- und Forstwirtschaft / Fischerei
Kohle, rohes Erdöl und Erdgas	Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden
Erze, Steine und Erden	Verarbeitendes Gewerbe
Nahrungs- und Genussmittel	Energieversorgung
Textilien, Bekleidung	Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung
Holzwaren, Papier, Druckerzeugnisse	Baugewerbe
Kokerei- und Mineralölzeugnisse	Handel, Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen
Chemische Erzeugnisse	Verkehr und Lagerei
Sonstige Mineralerzeugnisse	Gastgewerbe
Metall und Metallerzeugnisse	Information und Kommunikation
Maschinen	Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen
Fahrzeuge	Grundstücks- und Wohnungswesen
Möbel, Schmuck	Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen
Abfälle	Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen
Post, Pakete	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung
Geräte und Material für die Güterbeförderung	Erziehung und Unterricht
Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter	Gesundheits- und Sozialwesen
Sammelgut	Kunst, Unterhaltung und Erholung
Gutart unbekannt	Erbringung von sonstigen Dienstleistungen
Sonstige Güter	Private Haushalte mit Hauspersonal, Waren und Dienstleistungen durch private Haushalte für den Eigenbedarf ohne Schwerpunkt
	Exterritoriale Organisationen und Körperschaften

Tabelle 5-22: Beispiele für eine Klassifikation von Gutarten oder Wirtschaftszweigen / Branchen. Dargestellt ist jeweils nur die höchste Klassifikationsebene.

Eine weitere Form der Abbildung des Wirtschaftsverkehr unterscheidet sich durch die Ausdifferenzierung der Wirtschaftsverkehrssegmente und Fahrzeugklassen für die Umlegung. Die Wahl der Segmentierung sollte sich an Datengrundlage, Aufgabenstellung und örtlicher Wirtschaftsstruktur orientieren. Die in Tabelle 5-22 dargestellten Klassifikationen für Gutarten (NST-2007 [120]) oder für Wirtschaftszweige / Branchen (WZ 2008 [121]) können als Grundlage für die Segmentierung der Güterwirtschaftsverkehrsnachfrage in Wirtschaftsverkehrssegmente verwendet werden. Datengrundlagen, wie z.B. Verhaltensdaten aus der Güterkraftverkehrsstatistik des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) oder Siedlungsstrukturdaten zu Betrieben, orientieren sich i.d.R. an diesen Klassifikationen. Die Ausdifferenzierung der Fahrzeugklassen für die Umlegung erfolgt entlang unterschiedlicher Fahrzeugklassen, wie z.B. Lastwagen, Lastzüge oder Lieferwagen. In städtischen und

regionalen Modellen genügt in vielen Fällen die Berücksichtigung des Straßengüterverkehrs. In großräumigen oder teilnationalen Modellen ist der Einbezug unterschiedlicher Modi (z.B. Straße, Schienen oder Schifffahrt) eine Option. Innerhalb der Wirtschaftsverkehrssegmente muss dann neben der Zielwahl auch eine Moduswahl modelliert werden.

In einer noch komplexeren Abbildungsform des Wirtschaftsverkehrs werden beide, Personen- und Güterwirtschaftsverkehr, in einem eigenen Wirtschaftsverkehrsmodell dargestellt. Diese Form ermöglicht auch für den Personenwirtschaftsverkehr eine differenzierte Abbildung seines Verkehrsgeschehens. So können beispielweise die Tourencharakteristiken, die u.U. bei Dienstleistungsfahrten auftreten, im Modell berücksichtigt werden.

## Hinweise und Empfehlungen zum Wirtschaftsverkehr

<p><b>Allgemein</b></p> <p><u>Hinweise</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Für jedes Wirtschaftsverkehrssegment müssen für jede Modellstufe Parameter gesetzt oder unter Nutzung von Daten aus Wirtschaftsverkehrsbefragungen geschätzt werden. Für eine Schätzung müssen für jedes Wirtschaftsverkehrssegment eine ausreichende Menge an Datensätzen zur Verfügung stehen. Das ist bei der Segmentierung der Wirtschaftsverkehrsnachfrage bzw. beim Design einer Wirtschaftsverkehrsbefragung zu beachten.</li> <li>• Wichtige Quellen und Ziele des Wirtschaftsverkehrs (z.B. KV-Terminals, Güterverkehrszentren, Flughäfen) sind nach Möglichkeit als einzelne Verkehrszellen zu modellieren.</li> <li>• In städtischen und regionalen Modellen genügt im Güterwirtschaftsverkehr die Berücksichtigung des Straßengüterverkehrs. (Ausnahme: Untersuchungsgebiete mit signifikantem Umschlag von Gütern auf andere Verkehrsmodi, z.B. in der Nähe von Binnen- oder Seehäfen).</li> <li>• Weitere Hinweise finden sich in den FGSV „Empfehlungen zur Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen zu Berechnung des Wirtschaftsverkehrs“ [43]</li> </ul>
<p><b>Städtische / regionale Modelle</b></p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Personenwirtschaftsverkehr als einen eigenen Wegezweck (z.B. Dienst) im Personenverkehrsmodell abbilden.</li> <li>• Güterwirtschaftsverkehr in einem eigenen Wirtschaftsverkehrsmodell mit einem Wirtschaftsverkehrssegment und einer Fahrzeugklasse Lkw für die Umlegung abbilden.</li> </ul> <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Güterwirtschaftsverkehr aus einem eigenen Wirtschaftsverkehrsmodell mit differenzierten Wirtschaftsverkehrssegmenten (z.B. Branche Forstwirtschaft oder Gutart Post) und Fahrzeugklassen für die Umlegung (z.B. Lkw nach Gewichtsklasse (&lt; 7,5 t, &lt; 12 t, ≥ 12 t), Lieferwagen).</li> <li>• Personenwirtschaftsverkehr aus einem eigenen Wirtschaftsverkehrsmodell.</li> </ul>
<p><b>Großräumige / teilnationale Modelle</b></p> <p><u>Empfehlungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Personenwirtschaftsverkehr als einen eigenen Wegezweck (z.B. Dienst) im Personenverkehrsmodell abbilden.</li> <li>• Güterwirtschaftsverkehr in einem eigenen Wirtschaftsverkehrsmodell mit einem Wirtschaftsverkehrssegment und einer Fahrzeugklasse Lkw für die Umlegung abbilden.</li> </ul> <p><u>Optional</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Güterwirtschaftsverkehr aus einem eigenen Wirtschaftsverkehrsmodell mit differenzierten Wirtschaftsverkehrssegmenten (z.B. Branche Forstwirtschaft oder Gutart Post), Modi (z.B. Straße, Schiene, Schifffahrt) und Fahrzeugklassen für die Umlegung (z.B. Lkw nach Gewichtsklasse (&lt; 7,5 t, &lt; 12 t, ≥ 12 t), Lieferwagen)</li> <li>• Personenwirtschaftsverkehr aus einem eigenen Wirtschaftsverkehrsmodell.</li> </ul>

Tabelle 5-23: Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung der Verkehrsnachfrage im Wirtschaftsverkehr.

### 5.5.3 Eventverkehr

Der Eventverkehr umfasst private Personenfahrten, die aufgrund besonderer wiederkehrender Ereignisse (z.B. Messe, Sportveranstaltungen) auftreten. Sie müssen dann im Modell berücksichtigt werden, wenn für die zusätzliche Nachfrage besondere Maßnahmen geplant und untersucht werden sollen.

Eventverkehre können im Modell als weitere Wegezwecke abgebildet werden. Eventverkehre zeichnen sich dadurch aus, dass die Aktivitätenorte auf eine Verkehrszelle (z.B. Messegelände) oder wenige Verkehrszellen (Event mit mehreren Veranstaltungsorten) im Planungsraum begrenzt sind. Die Zielwahl erfolgt über ein zweiseitig fixiertes Modell, d.h. die vom Event zweiseitig angezogenen Wege werden auf möglichen Quellen verteilt. Die Verkehrsnachfrage je Modus wird in einer eigenen Nachfragematrix gespeichert, die dann bei Bedarf in der Umlegung berücksichtigt wird.

### Hinweise und Empfehlungen zum Eventverkehr

#### Allgemein

##### Hinweise

- Eventverkehre müssen dann im Modell berücksichtigt werden, wenn für die zusätzliche Nachfrage besondere Maßnahmen geplant und untersucht werden sollen.

##### Empfehlungen

- Eventverkehre als einen eigenen Wegezweck im Personenverkehrsmodell abbilden.

Tabelle 5-24: Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung der Verkehrsnachfrage im Eventverkehr.

## 5.6 Abbildung von Sharingangeboten

Für die kommenden Jahre wird erwartet, dass Mobilitätsangebote an Bedeutung gewinnen, bei denen Verkehrsmittel geteilt werden. Daraus ergibt sich die Anforderung, die Nachfragewirkungen von Sharingangeboten mit Nachfragemodellen zu ermitteln. Die Nachfrageermittlung ist aus zwei Gründen schwierig:

- Die Nachfragewirkungen hängen von der Gestaltung des Verkehrsangebots ab. Dazu müssen die Nutzungsbedingungen (z.B. Mitgliedschaft in einer Organisation), die Fahrtkosten, die Reisezeiten, die räumliche und die zeitliche Verfügbarkeit des Angebots bekannt sein. Die Planenden müssen also eine relativ konkrete Vorstellung des Verkehrsangebots haben.
- Die Bereitschaft zur Nutzung von Sharingangeboten ist zum jetzigen Zeitpunkt weitgehend unbekannt. Bei Mobilitätserhebungen, die das realisierte Mobilitätsverhalten von Personen erfassen, ist die Zahl der beobachteten Wege, die Sharingangebote nutzen, so gering, dass damit keine Parameterschätzungen möglich sind. Modellparameter – insbesondere für die Moduswahl – müssen deshalb mit Stated-Choice-Experimenten (siehe z.B. Ciari & Axhausen [27]) ermittelt oder mit Annahmen gesetzt werden.

Die Eigenschaften des zu untersuchenden Sharingangebots bestimmen die Art der Modellierung. Für die Modellierung müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Soll die Flottengröße des Sharingangebots vorgegeben werden oder soll die erforderliche Fahrzeugzahl mit dem Modell ermittelt werden?
- Ist das Sharingangebot Konkurrenz oder Teil des öffentlichen Verkehrs?
- Bietet das Sharingangebot eine individuelle Nutzung (Carsharing = mehrere Personen nutzen das selbe Fahrzeug nacheinander) oder eine kollektive Nutzung (Ridesharing = mehrere fremde Personen nutzen das selbe Fahrzeug gleichzeitig)?
- Werden die Fahrgäste beim Ridesharing mit vorhandenen Pkw-Fahrten anderer privater Personen befördert oder werden kommerzielle On-Demand-Angebote genutzt?

Im Folgenden werden Hinweise zur Abbildung von Sharingangeboten in einem Verkehrsnachfragemodell gegeben, die die Eigenschaften des Angebots berücksichtigen (siehe auch Friedrich et al. [66]).

### Verkehrsmodi

Ein Sharingangebot kann als Konkurrenzangebot zum bisherigen Verkehrsangebot oder als Ergänzung des öffentlichen Verkehrs konzipiert werden (Abbildung 5-19).

#### 1. Sharing als Konkurrenz:

- Eigenschaften des Angebots: Das Sharingangebot bietet zusätzliche Alternativen bei der Moduswahl.
- Abbildung im Modell: Es wird ein zusätzlicher Modus in der Moduswahl eingeführt, der in der Modellstufe der Moduswahl berücksichtigt wird. Die Nutzenfunktion des Modus muss mindestens die Komponenten Zeit, Kosten und Verfügbarkeit umfassen.

#### 2. Sharing als Teil des öffentlichen Verkehrs:

- Eigenschaften des Angebots: Das Sharingangebot ergänzt das fahrplangebundene ÖV-Angebot. Fahrgäste können das fahrplanungebundene Sharingangebot als Zu- und Abbringsystem zum fahrplangebundenen ÖV oder als direkte Beförderung ohne Umstieg in den fahrplangebundenen ÖV nutzen. Dazu müssen die Bedingungen für eine direkte Beförderung festgelegt werden, z.B. *direkte Beförderung, wenn  $[Zeitaufwand mit Umstieg] > [Zeitaufwand direkte Beförderung] \times [Faktor]$* . Die Nutzung des Sharingangebots kann mit zusätzlichen Fahrtkosten verbunden sein.
- Abbildung im Modell: Es wird kein zusätzlicher Modus eingeführt. Das Sharingangebot wird – ähnlich wie der ÖV-Fußweg – als ein zusätzliches ÖV-System ohne Fahrplanbindung in die ÖV-Umlegung integriert. Das erfordert eine ÖV-Umlegung, die fahrplangebundene und fahrplanungebundene Angebote verknüpfen kann. Eventuelle zusätzliche Kosten müssen in das Tarifmodell integriert werden. Das Sharingangebot definiert ein On-Demand-Angebot, dessen räumlich und zeitliche Ausprägung, anders als beim fahrplangebundenen ÖV, vom Ergebnis der Moduswahl abhängt und vorab nicht bekannt ist. Um die Zahl der erforderlichen Fahrzeugfahrten für dieses Angebot zu ermitteln, muss zuerst die Nachfrage mit einer Umlegung bestimmt werden. Die Umlegung ermittelt die Teilwege, die mit dem Sharingangebot zurückgelegt werden. Dazu muss das Ergebnis der Umlegung für jedes ÖV-System zeitlich differenziert gespeichert werden. Das erfordert ein fahrplanbasiertes Umlegungsverfahren.

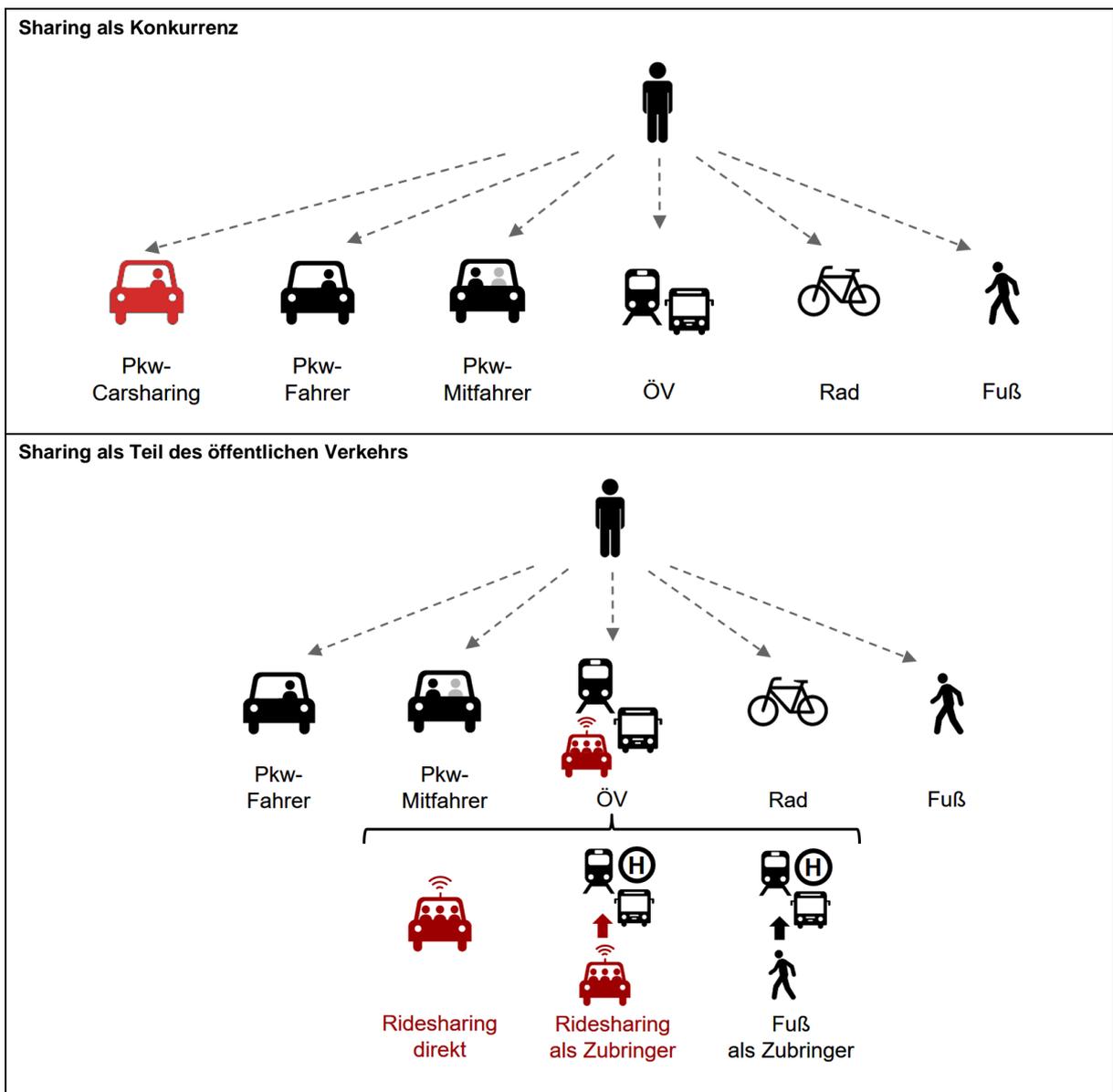


Abbildung 5-19: Sharingangebote als Konkurrenz zum ÖV erfordern einen zusätzlichen Modus. Sharingangebote als Teil des ÖV werden in die ÖV-Umlegung integriert (Bildquelle: in Anlehnung an Richter et al. [106]).

### Verfügbarkeit des Angebots

Ein Sharingangebot wird in der Regel räumlich, zeitlich und von der Zahl der Fahrzeuge begrenzt verfügbar sein.

#### 1. Räumliche Begrenzung:

- Eigenschaften des Angebots: Das Sharingangebot wird nur in einem Teilraum des Untersuchungsraums angeboten.
- Abbildung im Modell: Verkehrszellen, in denen das Sharingangebot verfügbar ist, werden markiert. Quelle-Ziel-Relationen, die nicht an einer Zelle mit Sharingangebot beginnen und enden, werden für die Moduswahl in der Kenngrößenmatrix mit einem hohen Aufwand belegt.

## 2. Zeitliche Begrenzung:

- Eigenschaften des Angebots: Das Sharingangebot wird nur zu gewissen Tageszeiten, z.B. in den Nachtstunden, angeboten oder ist in dieser Tageszeit besonders attraktiv.
- Abbildung im Modell: Die Moduswahl erfolgt bei makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen üblicherweise nicht differenziert nach der Tageszeit. Um die Tageszeit vereinfacht zu berücksichtigen, sind tageszeitabhängige Kenngrößenmatrizen und tageszeitabhängige Wegezwecke erforderlich. Die Moduswahl für den Wegezweck „Freizeit Abend“ wird dann mit einer anderen Kenngrößenmatrix durchgeführt als der Wegezweck „Freizeit Tag“.

## 3. Verfügbare Fahrzeugzahl:

- Eigenschaften des Angebots: Das Sharingangebot wird eine gewisse Flottengröße umfassen. Das Sharingangebot kann nur dann genutzt werden, wenn Fahrzeuge am Quellort einer Fahrt und zum Abfahrtszeitraum der Fahrt verfügbar sind.
- Abbildung im Modell: Die Zahl der Fahrzeuge wird auf Netzebene vorgegeben. Die Nutzenfunktion der Moduswahl wird um eine Komponente Verfügbarkeit ergänzt, die die Auslastung des Sharingangebots berücksichtigt. Bei einer geringen Auslastung beeinflusst die Verfügbarkeitskomponente die Moduswahl nicht, bei einer hohen Auslastung wird der Nutzen des Modus reduziert. Die Auslastung des Sharingangebots wird mindestens auf Netzebene, besser auf Verkehrszellenebene überprüft.
  - Eine einfache Überprüfung auf Netzebene ohne tageszeitliche Differenzierung erfordert eine Annahme über die mögliche Zahl der Fahrten, die ein Sharingfahrzeug an einem Tag bedienen kann. Die Auslastung ergibt sich dann als ein netzweiter Faktor aus der nachgefragten und der angebotenen Zahl der Fahrten.
  - Eine zellenbasierte Auslastung erfordert ein Verkehrsnachfragemodell, das Tageszeiten differenziert und die Zahl der Ausleih- und Rückgabevorgänge für jede Zelle protokolliert. Diese Vorgehensweise ist in Friedrich & Nökel [64] beschrieben.

## **Stationsgebundene oder stationsungebundene Sharingangebote**

Die Fahrzeuge eines Sharingangebots können nur an vorgegebenen Stationen ausgeliehen und abgegeben werden oder sie können an beliebigen Stellen abgestellt werden.

### 1. Stationsgebundene Sharingangebote:

- Eigenschaften des Angebots: Bei stationsgebundenen Sharingangeboten müssen die Fahrzeuge an vorgegebenen Stationen abgeholt und abgegeben werden.
- Abbildung im Modell: Die Stationen werden mit ihren Kapazitäten (Stellplätze) im Netzmodell verortet und mit dem Wegenetz verknüpft. Dazu ist ein geeignetes Netzelement oder ein Knoten mit besonderen Eigenschaften erforderlich. Für jede Verkehrszelle wird die mittlere Zeit zu den nächsten Ausleihstationen berechnet und als Zugangszeit bei der Moduswahl berücksichtigt. Die Verfügbarkeit von Fahrzeugen und freien Stellplätzen bei der Rückgabe wird für jede Station

tageszeitabhängig protokolliert und wie oben beschrieben bei der Moduswahl als auslastungsabhängige Verfügbarkeitskomponente berücksichtigt.

## 2. Stationsungebundene Sharingangebote:

- Eigenschaften des Angebots: Bei stationsungebundenen Sharingangeboten können die Fahrzeuge an beliebigen Orten abgegeben werden.
- Abbildung im Modell: Der Modellraum wird in Teilräume unterteilt. Jede Verkehrszelle wird einem Teilraum zugeordnet. Die Zahl der verfügbaren Fahrzeuge wird jetzt für jeden Teilraum protokolliert. Die Zugangszeit zum Fahrzeug ergibt sich aus der aktuellen Fahrzeugdichte in jedem Teilraum. Mit zunehmender Dichte sinkt die Zugangszeit, da die Wahrscheinlichkeit ein Fahrzeug in der Nähe zu finden, steigt.

## **Bündelung von Fahrtwünschen**

Bei einem Ridesharingsystem werden die Fahrtwünsche mehrerer Personen zu einer Fahrzeugfahrt gebündelt. Für die Beförderung von Fahrgästen stehen entweder vorhandene Pkw-Fahrten anderer privater Personen zur Verfügung oder es werden kommerzielle On-Demand-Angebote genutzt.

### 1. Beförderung mit vorhandenen Pkw-Fahrten (= Vermittlung einer Mitfahrgelegenheit):

- Eigenschaften des Angebots: Ein Pkw-Selbstfahrer (Anbieter) bietet anderen Reisenden (Nachfrager) die Möglichkeit, in seinem Fahrzeug umsonst oder gegen ein Entgelt mitzufahren. Die angebotene Fahrt ergibt sich allein aus dem Fahrtwunsch des Anbieters und umfasst Quelle, Ziel, Abfahrtszeit und Route der Fahrt. Decken sich die Fahrtwünsche eines Anbieters und eines Nachfragers räumlich und zeitlich, dann können die Fahrten gebündelt werden.
- Abbildung im Modell: Um die Fahrtwünsche zu Fahrzeugfahrten zu bündeln, ist ein Bündelungsalgorithmus erforderlich. Hierfür kommen verschiedene Ansätze in Frage. Friedrich et al. [62] beschreiben einen Ansatz, der sich besonders für makroskopische Nachfragemodelle eignet. Dieser Algorithmus hat die folgenden Eigenschaften:
  - Die Verkehrsnachfrage wird in Zeitintervalle (z.B. 96 Intervalle von 15 Minuten) aufgeteilt. Für jedes Zeitintervall werden Fahrtwünsche gebündelt. Als Angebot werden alle Wege oder ein Teil der Wege der Pkw-Fahrtenmatrix genutzt.
  - Der Algorithmus bündelt nicht die Wege einzelner Personen, sondern vergleicht eine Menge von Routen zwischen Verkehrszellen, die mit einer Bestwegumlegung ermittelt werden. Jede Route hat eine spezifische, nicht-ganzzahlige Nachfrage und eine nicht-ganzzahlige Kapazität, die von der Fahrzeuggröße abhängt.
  - Die räumliche Bündelung der Routen erfolgt nicht auf der Ebene des Straßennetzes, sondern auf der Ebene der Verkehrszellen. Dazu wird die Streckenfolge einer Route in eine Folge von Verkehrszellen transformiert. Die Reihenfolge der Verkehrszellen definiert einen Korridor entlang der Route, in dem die Nachfrage anderer Routen gebündelt werden kann.

## 2. Beförderung mit kommerziellen On-Demand-Angeboten:

- **Eigenschaften des Angebots:** Die Beförderung der Fahrgäste erfolgt mit kommerziellen On-Demand-Angeboten. Ein Anbieter bietet Fahrten an und versucht mehrere Fahrtwünsche durch Umwegfahrten oder durch eine Anpassung der Abfahrtszeiten zu einer Fahrzeugfahrt zu bündeln. Ob die Fahrzeuge von professionellen Fahrern gesteuert werden oder zukünftig fahrerlos betrieben werden können, ist für die Beförderung unerheblich.
- **Abbildung im Modell:** Die Modellierung erfolgt mit dem oben beschriebenen Bündelungsalgorithmus. Anders als im Fall 1 wird die Menge der angebotenen Fahrten nicht aus der Pkw-Fahrtenmatrix abgeleitet, sondern ergibt sich direkt aus der Matrix der Fahrtwünsche, die sequentiell gebündelt werden.

## **Umlaufbildung von Sharingfahrzeugen**

- **Eigenschaften des Angebots:** Carsharing- und Ridesharingangebote können effizienter betrieben werden, wenn die Fahrzeuge umgesetzt werden können. Das ist bei vollautomatisierten Fahrzeugen ohne Fahrer möglich. Bei Ridesharingangeboten mit professionellen Fahrern können die Fahrer das Fahrzeug umsetzen, so wie es heute im Taxiverkehr oder im öffentlichen Busverkehr der Fall ist. Dabei entstehen jedoch Leerfahrten und Leerfahrkilometer, die zu zusätzlichem Verkehr führen.
- **Abbildung im Modell:** Mit einer Umlaufbildung, bei der die nachgefragten Lastfahrten miteinander verkettet und durch Leerfahrten zu Umläufen ergänzt werden, können die Leerfahrten und die Zahl der erforderlichen Fahrzeuge ermittelt werden. Um Lastfahrten zu Umläufen zu verketten, müssen Zielzelle und Endzeitintervall einer Fahrt zu Startzelle und Startzeitintervall der nachfolgenden Fahrt passen. Ist eine Verkettung von Lastfahrten nicht möglich, können Leerfahrten genutzt werden, um Lücken zu schließen oder zusätzliche Fahrzeuge angeschafft werden. Für makroskopische Nachfragemodelle wird eine Umlaufbildung benötigt, die mit nicht-ganzzahligen Nachfragemengen umgehen kann. In Richter et al. [105] ist die Aufgabe der Umlaufbildung als ein Flussproblem formuliert, das die Verkettung von nicht-ganzzahligen Lastfahrten unter Verwendung möglichst weniger Fahrzeuge ermöglicht.

## **Einbindung von Sharingangeboten in ein Verkehrsnachfragemodell**

Abbildung 5-20 zeigt die erforderlichen Modellerweiterungen für die Einbindung von Sharingangeboten in die Modellstufen eines Verkehrsnachfragemodells:

- **Mobilitätswerkzeugwahl:** Wird davon ausgegangen, dass das Sharingangebot viele Pkw-Wege ersetzen wird, kann das Sharingangebot den Pkw-Besitz beeinflussen. Das erfordert Annahmen zur Veränderung der Pkw-Verfügbarkeit oder die Erweiterung des Nachfragemodells um ein Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodell.
- **Moduswahl:** In der Moduswahl müssen Sharingangebote, die nicht in den ÖV integriert sind, als zusätzlicher Modus abgebildet werden.

- Bündelung von Personenfahrten: Nach der Moduswahl muss die Nachfrage nach Ridesharingangeboten von Personenfahrten in Fahrzeugfahrten umgerechnet werden. Dafür ist ein Bündelungsalgorithmus erforderlich.
- Umlaufbildung: Wenn Sharingfahrzeuge umgesetzt werden sollen, dann müssen die Leerfahrten mit einer Umlaufbildung ermittelt werden.
- Routenwahl / Umlegung: Nach der Bündelung von Personenfahrten zu Fahrzeugfahrten und der Ermittlung von Leerfahrten werden alle Kfz-Matrizen (private Pkw, geteilte Pkw inkl. Leerfahrten, Lkw) auf das Straßennetz umgelegt. Ergebnis sind Fahrtzeiten im belasteten Straßennetz.
- Rückkopplung: Mit der Rückkopplung werden zum einen die Fahrtzeiten für die Ziel- und die Moduswahl angepasst. Außerdem wird aus der Auslastung der Sharingangebote (= [Nachfrage nach Sharingfahrzeugen] / [Verfügbare Sharingfahrzeuge]) eine Verfügbarkeit ermittelt, die in die Nutzenfunktion der Moduswahl eingeht.

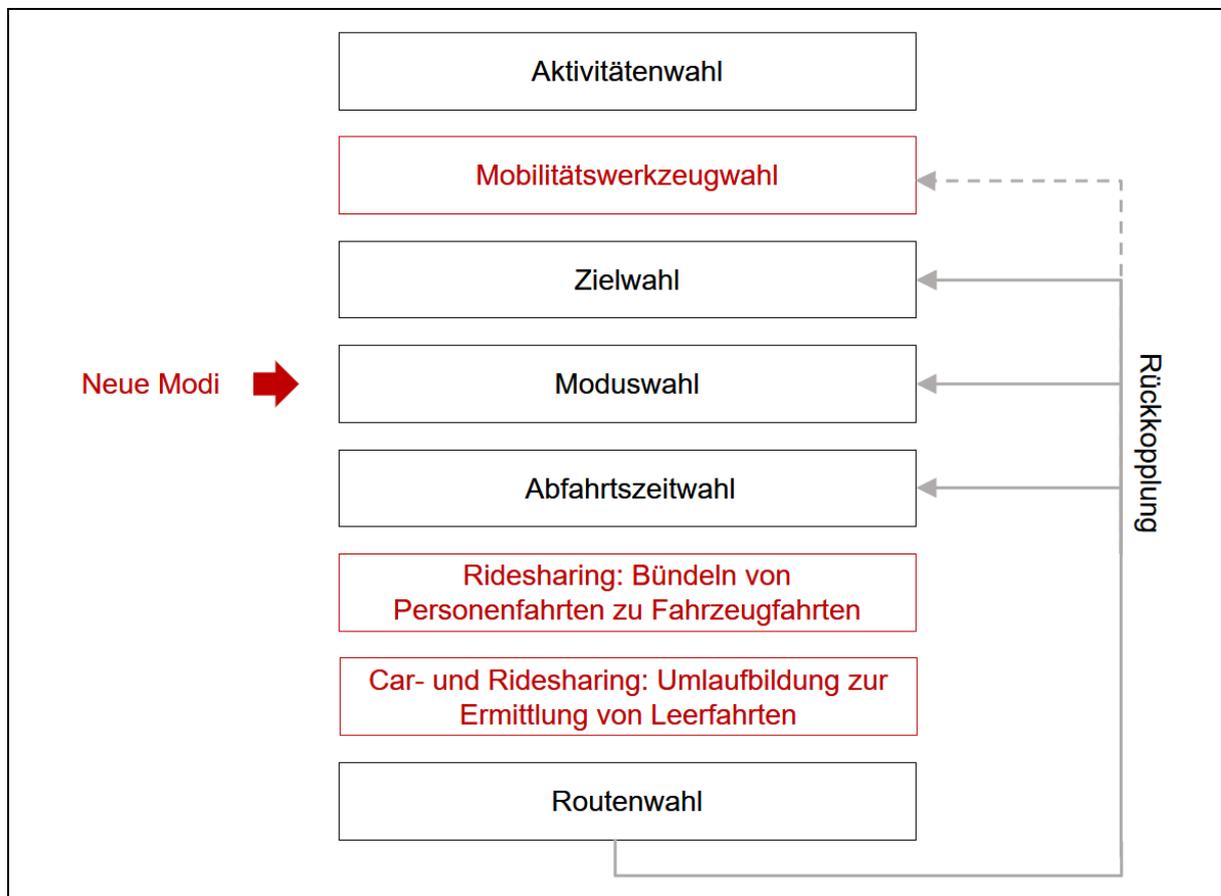


Abbildung 5-20: Einbindung von Sharingangeboten in die Modellstufen eines Verkehrsnachfragemodells (Bildquelle: in Anlehnung an Friedrich et al. [66]).

## Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung von Sharingangeboten

### Allgemein

#### Hinweise

- Heute verfügbare Sharingangebote (Carsharing, Ridesharing, öffentliche Fahrradverleihsysteme) werden in deutschsprachigen Ländern für weniger als 1% aller Wege genutzt. Für die Beschreibung der heutigen Verkehrsnachfrage in einem Untersuchungsraum können deshalb Wege mit Sharingfahrzeugen – ähnlich wie Wege mit dem Taxi – vernachlässigt werden.
- Verkehrsnachfragemodelle können keine belastbaren Aussagen zur Wirkung von Verkehrsangeboten machen, die nur eine kleine Anzahl von Personen befördern können. Wenn pro 1.000 Einwohner ein Sharingfahrzeug angeboten wird, sind keine statistisch abgesicherten Aussagen möglich, in welchem Umfang die Moduswahl beeinflusst wird und welche Netzelemente von den Fahrzeugen genutzt werden. Verkehrsnachfragemodelle können dann nur Tendenzen der Wirkung abschätzen.
- In einem Untersuchungsraum, in dem ein Sharingangebot mit einer geringen Verfügbarkeit eingeführt wird, benötigen die Nutzer des Systems eine Modus-Alternative als Ersatzsystem, z.B. für die Rückfahrt zur Wohnung. Als Ersatzsystem kommt vor allem der ÖV in Frage. Das kann dazu führen, dass es bei Sharingangeboten mit einer geringen Verfügbarkeit vor allem zu Verlagerungen vom ÖV kommt. Diese Zusammenhänge kann ein Verkehrsnachfragemodell nur durch eine Anpassung der Modellstruktur (z.B. Nested-Logit-Modell mit einem Nest ÖV, das aus ÖV und Sharing besteht) abbilden.
- Die Einführung eines neuen Modus (z.B. Carsharing) in ein kalibriertes Moduswahlmodell vom Typ Logit wird von allen Modi den gleichen Anteil der Nachfrage abgreifen. Das kann eine erneute Kalibrierung des Moduswahlmodells erfordern.
- Für die Untersuchung der Wirkungen von Sharingsystemen sind Verkehrsnachfragemodelle erforderlich, die die Wirkungen von Preisen abbilden können, da die Kosten für die Nutzung der Sharingangebote einen großen Einfluss auf die Wahl haben.
- Für die Untersuchung der Wirkungen von Sharingsystemen sind Verkehrsnachfragemodelle erforderlich, die die Nachfrage differenziert nach Tageszeiten abbilden. Nur so kann die Auslastung und damit die Verfügbarkeit von Sharingfahrzeugen, ermittelt werden.
- Die Abbildung von Sharingangeboten ist bisher nicht Stand der Technik bei der Nachfragemodellierung. Es gibt Anwendungen makroskopischer Nachfragemodelle (z.B. Friedrich et al. [61] oder Yin et al. [137]) und mikroskopischer Nachfragemodelle (z.B. Bischoff & Maciejewski [10] oder Fagnant & Kockelman [40]) in Forschungsprojekten. Modellnutzer in praktischen Anwendungen sollten sich im Klaren sein, dass es noch schwierig ist, Aussagen zum Aufwand für die Modellerstellung und zur Qualität der Ergebnisse zu treffen.

### Städtische / regionale Modelle

#### Empfehlungen

- Ein makroskopisches Verkehrsnachfragemodell sollte die Nachfrage in 96 Zeitintervalle von je 15 Minuten differenzieren.
- Bei Ridesharing erfolgt die Bündelung der Fahrtwünsche für jedes Zeitintervall.
- Für einen Sharingmodus werden pro Zeitintervall drei Nachfragematrizen (Personenfahrten, Fahrzeug-Lastfahrten, Fahrzeug-Leerfahrten) angelegt. Die Umrechnung von Personenfahrten in Fahrzeugfahrten erfolgt beim Ridesharing mit einem Bündelungsalgorithmus und beim Carsharing mit einem Besetzungsgrad, der fahrtzweckabhängig sein kann.

### Großräumige / teilnationale Modelle

#### Empfehlungen

- Bei großräumigen Modellen genügt es die Nachfrage in 24 Zeitintervalle von je 60 Minuten zu differenzieren.

Tabelle 5-25: Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung von Sharingangeboten.

## 5.7 Externer Verkehr

Der externe Verkehr umfasst alle Ortsveränderungen im Personen- und Wirtschaftsverkehr, deren Quellen und / oder Ziele außerhalb des Untersuchungsraums liegen. Diese Ortsveränderungen müssen aus übergeordneten Modellen (nationale Modelle) übertragen werden oder durch besondere Erhebungen erfasst werden:

- Externer Verkehr aus übergeordneten Modellen:  
Da übergeordnete Modelle mit gröberen Verkehrszelleneinteilungen arbeiten, müssen die Nachfragematrizen mit geeigneten Gewichten (z.B. Einwohner und Arbeitsplätze) gesplittet werden. Für eine zeitliche Differenzierung der übergeordneten Nachfrage eignen sich erhobene Nachfrageganglinien an der Grenze des Untersuchungsraums. Näherungsweise kann aus den tageszeitabhängigen Nachfragematrizen im Untersuchungsraum eine aggregierte Ganglinie abgeleitet werden. Im motorisierten Individualverkehr müssen Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr enthalten sein. Im öffentlichen Verkehr kann der Durchgangsverkehr dann unberücksichtigt bleiben,

wenn er mit Fernverkehrszügen oder Fernbussen erfolgt, die nicht Gegenstand der Planung sind. Um im übergeordneten Modell den relevanten Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr zu bestimmen, ist eine Vorgehensweise empfehlenswert, bei der die Nachfrage aus einer Umlegung im übergeordneten Modell abgeleitet wird. Dabei wird die Nachfrage aus den Routen abgeleitet, die Verkehrswege im Untersuchungsraum nutzen. Der externe Verkehr sollte mit Zählwerten am Rand des Untersuchungsraums validiert werden.

- Externer Verkehr aus Erhebungen:

Im MIV können Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehre durch Kordonerhebungen an der Grenze des Untersuchungsraums erfasst werden. Dazu werden Zählungen mit Befragungen (Interview einer Stichprobe aller Fahrzeugführer) oder Beobachtungen (Kennzeichenerfassung) kombiniert. Die Quellen- und Ziele im Untersuchungsraum werden sich mit dieser Methode allerdings nicht statistisch abgesichert einzelnen Zellen zuordnen lassen. Deshalb müssen die Erhebungsdaten wie bei den Daten aus übergeordneten Modellen mit geeigneten Gewichten gesplittet und auf die Grundgesamtheit der gezählten Fahrzeuge hochgerechnet werden. Im ÖV können externe Verkehre durch Zählungen und Befragungen im ÖV-Fahrzeug erfasst werden. Möglicherweise können zukünftig Nachfragematrizen, die aus Mobilfunkdaten gewonnen werden, für den externen Verkehr genutzt werden.

## Hinweise und Empfehlungen zum externen Verkehr

### Allgemein

#### Hinweise

- Externer Verkehr wird in der Regel die Modi des motorisierten Verkehrs (Pkw, Lkw und ÖV) umfassen. Der nicht-motorisierte Verkehr kann vernachlässigt werden, da die Entfernungen zwischen dem Außenraum und dem Planungsraum groß sind. Flugverkehr und intermodaler Güterverkehr kann als singuläre Verkehrserzeuger über eine eigene Zelle (Flughafen, Güterterminal) abgebildet werden.
- Externe Matrizen werden in der Regel differenziert nach Modus, nicht aber nach Wegezweck, vorliegen.
- Verkehre mit Quelle und / oder Ziel außerhalb des Untersuchungsraumes müssen auf die Verkehrszellen des Untersuchungsraumes aufgeschlüsselt werden.
- Externe Verkehre können mit dem Nachfragemodell nicht prognostiziert werden. Sie müssen deshalb für jedes Prognosejahr aus der externen Quelle vorliegen oder anderweitig fortgeschrieben werden.
- Eine externe Matrix kann genutzt werden, um die zellenspezifischen Parameter für den Untersuchungsraumanteil zu bestimmen. Untersuchungsraumanteile aus der externen Quelle sollten mit Mobilitätshebungen im Untersuchungsraum abgeglichen werden.
- Die Verkehrsleistung des externen Verkehrs wird im Untersuchungsraum einen relativ hohen Anteil der gesamten Verkehrsleistung ausmachen. Bei der Untersuchung von Maßnahmenwirkungen sollten Änderungen der Verkehrsleistung deshalb differenziert nach dem externen Verkehr und dem Binnenverkehr des Untersuchungsraums analysiert werden.
- Ob eine Quelle-Ziel-Relation bezogen auf den Untersuchungsraum Durchgangsverkehr (Route führt durch den Untersuchungsraum) oder Außenverkehr (Route führt nicht durch den Untersuchungsraum) ist, ergibt sich aus der Routenwahl. Um den Durchgangsverkehr zu ermitteln ist deshalb eine Umlegung des externen Verkehrs auf das Netz des übergeordneten Modells empfehlenswert. Die Nachfrage wird dann aus den Routen abgeleitet, die Verkehrswege im Untersuchungsraum nutzen. Falls für das übergeordnete Modell keine Umlegung zur Verfügung steht, wird der Außenverkehr wie der Durchgangsverkehr behandelt. Das Netzmodell sollte dann auch wichtige überregionale Verkehrswege außerhalb des Untersuchungsraums enthalten.
- Im Kfz-Verkehr beeinflusst der Durchgangsverkehr die Netzauslastung und damit die Reisezeiten im Untersuchungsraum. Er muss deshalb möglichst genau abgebildet werden.
- Im ÖV beeinflusst der Durchgangsverkehr zwar die Auslastung der ÖV-Fahrzeuge, aber nicht die Reisezeiten im Untersuchungsraum. Deshalb ist es nicht erforderlich den Durchgangsverkehr im ÖV abzubilden.

#### Empfehlungen

- Externe Matrizen sollten als eigenes Nachfragesegment umgelegt werden, um so die Verkehrsleistung differenziert nach externem Verkehr und Binnenverkehr des Untersuchungsraums analysieren zu können.
- Externer Kfz-Verkehr soll außerhalb des Untersuchungsraums in das Netzmodell eingespeist werden und nicht an Kordonknoten am Rand des Untersuchungsraums. So können Einflüsse von Änderungen im Straßennetz auf die großräumige Routenwahl berücksichtigt werden.
- Externer ÖV soll an Haltestellen außerhalb des Untersuchungsraums in das Netzmodell eingespeist werden, an denen die in den Untersuchungsraum einfahrenden Linien halten. Eine Einspeisung des externen ÖV an einem Fernbahnhof oder Fernbusterminal im Untersuchungsraum ist nur dann angemessen, wenn die Fernlinien genau einen Halt im Untersuchungsraum haben. Für den Fernbahnhof bzw. das Fernbusterminal muss dann eine eigene Zelle vorgesehen werden.
- Zur Validierung des externen Verkehrs sollten an der Grenze des Untersuchungsraums Zählungen durchgeführt werden.
- Wenn der in einen Untersuchungsraum einfahrende, ausfahrende und durchfahrende Verkehr unterschiedliche zeitliche Verteilungen aufweist, dann muss der externe Verkehr für jeden Modus in mindestens drei Matrizen (Zielverkehr, Quellverkehr, Durchgangsverkehr) aufgeteilt werden. Alternativ müssen Matrizen für jede Tageszeit (z.B. Stundenmatrizen) erzeugt werden.
- Um zeitlich differenzierte Matrizen zu erzeugen, sollten Tagesganglinien an der Grenze des Untersuchungsraums erfasst werden.

#### Optional

- Matrixkorrektur der externen Matrizen mit Zählwerten an der Grenze des Untersuchungsraums.

### Städtische / regionale Modelle

#### Empfehlungen

- Der externe Verkehr wird aus einem Landes- oder Bundesmodell übernommen.
- Im Außenraum sollten die Verkehrszellen eines Landes- oder Bundesmodells als Außenzellen genutzt werden.
- Gibt es im Untersuchungsraum auf allen Fernverkehrsstraßen zu viel oder zu wenig Verkehr, kann der externen Verkehr mit einer Matrixkorrektur so angepasst werden, dass die Verkehrsstärken besser passen.

### Großräumige / teiltonationale Modelle

#### Empfehlungen

- Der externe Verkehr wird aus einem Bundesmodell oder einem EU-Modell übernommen.

Tabelle 5-26: Hinweise und Empfehlungen zum externen Verkehr.

## 5.8 Prognose

Eine Verkehrsprognose baut auf einem validierten Verkehrsnachfragemodell auf, das den Analysefall beschreibt. Die Erstellung einer Prognose umfasst in der Regel die folgenden Schritte:

1. Festlegung eines Prognosezeitpunkts,
2. Fortschreibung der für die Entwicklung des Verkehrs relevanten demographischen Daten, Siedlungsstrukturdaten, Motorisierungsgrade und Nutzungskosten für den Prognosezeitpunkt,
3. Erfassung der für die Entwicklung des Verkehrs bedeutsamen und bis zum Prognosezeitpunkt mit hoher Wahrscheinlichkeit realisierten Maßnahmen im Verkehrsangebot,
4. Erfassung externer Nachfragedaten für den Prognosezeitpunkt, die mit dem Verkehrsnachfragemodell nicht erzeugt werden können,
5. Durchführung der Prognoserechnung und Überprüfung der Plausibilität des Prognoseergebnisses und
6. Ermittlung der gewünschten Kenngrößen für den Prognosezustand.

Bei der Festlegung der Prognoseannahmen muss entschieden werden, ob die  $\beta$ -Parameter der Nutzenfunktionen, die die Präferenzen der Menschen widerspiegeln, anzupassen sind. Die Präferenzparameter werden aus dem im Analysefall beobachteten Verhalten, z.B. mit der Maximum-Likelihood-Schätzung, abgeleitet. In der Regel wird davon ausgegangen, dass sich die Präferenzen der Personen einer Gruppe nicht ändern. Ein Verkehrsnachfragemodell kann keine Aussagen zu zukünftigen Verhaltenspräferenzen machen, wohl aber zum zukünftigen Verhalten bei veränderten Randbedingungen. Eine Maßnahme, die zu höheren Kosten für den Pkw führt, wird das Verhalten der Menschen bei der Moduswahl beeinflussen. Das ist dann aber nicht auf veränderte Präferenzen, z.B. durch bewusstseinsbildende Maßnahmen, zurückzuführen, sondern auf einen veränderten Entscheidungskontext. Immer dann, wenn Bewusstseinsänderungen oder bisher nicht beobachtbare Verhaltenspräferenzen (z.B. Bereitschaft zur Nutzung von Sharingangeboten) untersucht werden sollen, müssen entweder Annahmen getroffen oder wahrscheinliche Verhaltenspräferenzen auf der Basis sogenannter Stated-Preference-Untersuchungen („Was würden Sie tun, wenn ...?“) geschätzt werden.

Der so ermittelte Prognosezustand wird als Bezugsfall oder Referenzfall bezeichnet. Aufbauend auf diesem Bezugsfall können dann mit dem Verkehrsnachfragemodell die Wirkungen ausgewählter Maßnahmen oder Entwicklungen berechnet werden. Diese Zustände werden dann als Planfälle oder Szenarien bezeichnet.

## Hinweise und Empfehlungen zur Prognose

### Allgemein

#### Hinweise

- Die Nummerierung der Netzelemente darf sich zwischen Analyse und Prognose nicht ändern, da sonst keine Vergleiche und Differenzdarstellungen möglich sind.
- In der Analyse und in der Prognose werden die Modellparameter beibehalten. Eventuelle Änderungen der Parameter sind zu begründen.
- Wenn Siedlungsstrukturdaten über Point of Interest Objekte abgebildet werden, dann müssen neue Standorte durch zusätzliche Objekte in das Netzmodell eingepflegt werden. Da die genauen Standorte zum Zeitpunkt der Prognoseerstellung oft nicht bekannt sind, können virtuelle Standortprojekte eingefügt werden.
- Wenn für den Prognosezeitpunkt für neue ÖV-Linien nur Takte, aber keine Fahrpläne vorliegen, dann können Umsteigewartezeiten nicht genau berechnet, sondern nur abgeschätzt werden. In diesem Fall sind sowohl im Analysefall als auch im Bezugsfall taktbasierte Umlegungsverfahren anzuwenden. Alternativ können fahrplanbasierte Umlegungsverfahren zum Einsatz kommen. Hier muss in der Nutzenfunktion der Parameter für die Bewertung der Umsteigewartezeit auf 0 gesetzt und der Parameter für die Bewertung der Umsteigehäufigkeit erhöht werden.
- Veränderungen der Strukturgrößen (Arbeitsplätze, Schulplätze, Einkaufsgelegenheiten) verändern in Verkehrsnachfragemodellen die Zielwahl, aber nicht das Verkehrsaufkommen (Zahl der Wege). Das Verkehrsaufkommen ergibt sich aus der Einwohnerzahl und der Demografie (altersabhängige Personengruppen).
- Bei veränderten Einwohnerzahlen sollte geprüft werden, ob Ausbildungseinrichtungen und Einrichtungen der Daseinsvorsorge angepasst werden müssen.
- Externe Nachfragematrizen, für die es keine Prognosematrix gibt, müssen auf geeignete Weise fortgeschrieben werden.
- Nachfragematrizen, die bei der Modellkalibrierung mit einem Matrixkorrekturverfahren an Zählwerte angepasst wurden, sind nicht prognosefähig. Werden die Korrekturmatriizen in der Prognose beibehalten, dann muss sichergestellt werden, dass die sich ergebenden Nachfragematrizen für die Umlegung keine negativen Werte enthalten. Das wird durch die in Kapitel 5.1.10 beschriebenen Verfahren gewährleistet.

#### Empfehlungen

- Für Flächen, die im Prognosezeitraum entwickelt werden sollen, sind bereits im Analysefall Verkehrszellen vorzusehen.
- Geplante Infrastrukturmaßnahmen sind im Netzmodell durch geeignete Maßnahmennummern zu kennzeichnen. Die Maßnahmen können dann zu Szenarien gebündelt werden.
- Die Modellrechnungen (Auswahl der Maßnahmen, Setzen der Strukturgrößen) und die Modellauswertungen sollten ausgehend vom Bezugsfall automatisiert (z.B. mit einem Skript) ohne manuelle Eingriffe durchgeführt werden, so dass die Modellrechnungen reproduzierbar sind.

#### Optional

- Korrekturmatriizen in der Prognose nicht berücksichtigen. Die Verkehrsleistung der Korrekturmatrix im Analysefall ausweisen und bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigen.
- Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle für die Prognose des zukünftigen Motorisierungsgrads und Zeitkarten-Besitzes.

Tabelle 5-27: Hinweise und Empfehlungen zu Prognosen.

## 6 Datengrundlagen und Datenquellen

Die notwendigen Datengrundlagen für die Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells lassen sich in 5 Hauptgruppen einteilen:

- Daten zur Modellierung des Verkehrsangebots,
- Daten zur Bevölkerung und Flächennutzung im Untersuchungsraum (Siedlungsstrukturdaten),
- Daten zum Mobilitätsverhalten der Bevölkerung im Untersuchungsraum,
- Daten zum Verkehrsablauf im Netz (Verkehrsstärken und Fahrtzeiten) und
- Verkehrsnachfragedaten, die nicht vom Verkehrsnachfragemodell berechnet werden (Externe Matrizen).

Im Folgenden werden die notwendigen Daten im Detail inklusive der möglichen Datenquellen beschrieben. Im Rahmen dieses Projektes wurde zudem eine Checkliste für Eingangsdaten der Verkehrsnachfragemodellierung erstellt (siehe Anlage 3).

### 6.1 Daten zur Modellierung des Verkehrsangebots

Daten zum Verkehrsangebot der im Modell definierten Verkehrsmodi werden in allen Entscheidungsstufen der Verkehrsnachfragemodellierung benötigt. Die Daten werden zum überwiegenden Teil als Kenngrößenmatrizen mit Hilfe von Routensuchverfahren aus Netzmodellen generiert und dem Nachfragemodell bereitgestellt. In der Regel werden Netzmodelle für die Straße und den öffentlichen Verkehr erstellt. Neuere Modelle enthalten auch ein eigenes Netzmodell für den Radverkehr. Die explizite Abbildung des Fußverkehrs beschränkt sich in der Regel auf die Modellierung von Zubringer- und Umsteigewegen von Haltestellen. Eine Umlegung des Fußverkehrs ist nicht Stand der Forschung bzw. Technik, daher erfolgt keine explizite Abbildung des gesamten Fußwegenetzes.

Die Bereitstellung der Netzmodelle für die verschiedenen Modi kann auf verschiedene Weise erfolgen.

#### 6.1.1 Straßennetzmodell

Mit Hilfe des Straßennetzmodells sollen möglichst realistische Reisezeiten zwischen zwei beliebigen Punkten im Netzmodell berechnet werden können. Dazu sind Informationen zu den Streckenlängen und Streckengeschwindigkeiten notwendig. Die Entfernungen zwischen Netzknoten (Streckenlängen) können im Falle einer genauen topographischen Modellierung von der Modellsoftware berechnet werden. Zusätzlich sollten für die Abschätzung von Streckenkapazitäten Informationen zur Fahrstreifenanzahl der Strecken vorhanden sein. Steigung und Kurvigkeit können die Kapazität und die freie Geschwindigkeit einer Strecke ebenfalls beeinflussen. Für den Wirtschaftsverkehr sollten Informationen über besondere Netzattribute für den Güterverkehr (z.B. Durchfahrtsbeschränkungen, spezielle Beschilderung) vorhanden sein.

Es existieren folgende Verfahren zur Bereitstellung der Netzdaten:

- manuelle Kodierung des Netzmodells,

- Übernahme aus vorhandenen Modellen,
- Ableitung von Netzmodelldaten auf Basis vorhandener Straßendatenbanken,
- Beschaffung von Netzdaten von kommerziellen Anbietern und
- Verwendung von Crowdsourcing-Daten (OpenStreetMap).

Die manuelle Kodierung von Netzmodellen ist nur bei kleinen Modellräumen zu empfehlen. Für die manuelle Kodierung wird eine geeignete Erfassungssoftware benötigt, die neben der einfachen und fehlerfreien Erfassung und Speicherung von Knoten, Kanten und der benötigten Attribute, auch die Möglichkeit bieten sollte, Rasterdaten (z.B. gescannte Karten) im Hintergrund anzuzeigen, um so eine ausreichend genaue topographische Erfassung der Knoten und Kanten zu ermöglichen.

Die Landesbehörden der Bundesländer pflegen Straßendatenbanken – sogenannte Straßeninformationssysteme oder Straßeninformationssysteme (SIB), die in der Regel alle klassifizierten Straßen im jeweiligen Bundesland enthalten. Diese Daten können in Standardformaten von den Ländern bereitgestellt werden. Allerdings enthalten die Daten nur die klassifizierten Straßen, wodurch viele relevante städtische Straßen fehlen. Ein konsistenter Netzzusammenhang ist bei den Straßendatenbanken ebenso nicht gegeben und muss bei der Modellerstellung hergestellt werden. Der Aufwand hierfür und die erreichbare Qualität der Netzabbildung sollte bei Nutzung dieser Datenquelle vorab bestimmt werden.

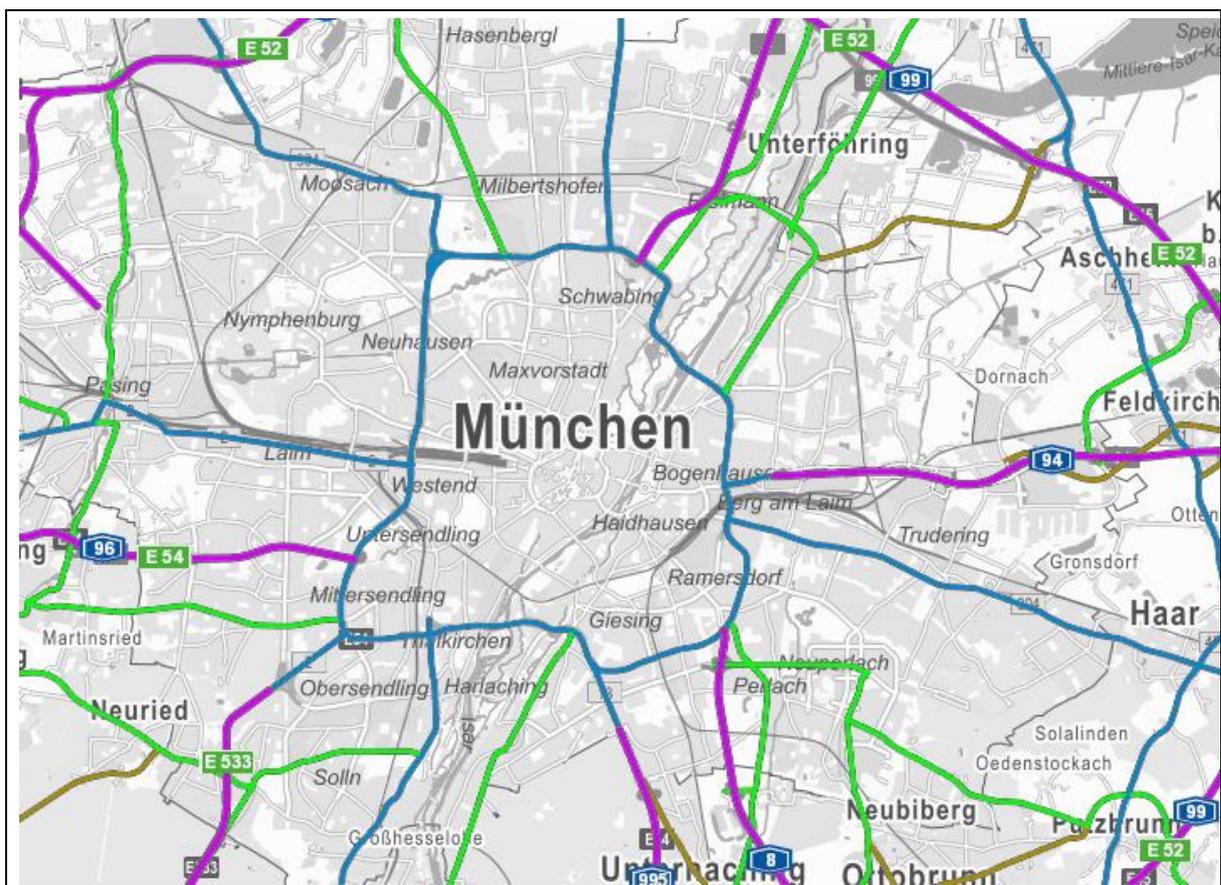


Abbildung 6-1: Ausschnitt aus BAYSIS (Bayerisches Straßeninformationssystem). Alle klassifizierten Straßen sind farbig dargestellt. Die grauen Straßen sind nicht im BAYSIS enthalten und sind nur als Rasterdaten im Hintergrund dargestellt (Bildquelle: BAYSIS [8]).

Der Erstellung des Straßennetzmodells auf Basis von Daten von kommerziellen Anbietern ist bei größeren Modellräumen eine geeignete Methode. Diese Daten werden in Pkw-Navigationsgeräten verwendet und haben daher eine gute Qualität bezüglich der topographischen Genauigkeit und der Versorgung mit Geschwindigkeitsdaten. Sie erhalten in Deutschland auch gute Informationen zur Fahrstreifenanzahl der Strecken. Die Daten der Hersteller (z.B. TomTom N.V., HERE Global B.V) können in Deutschland bei verschiedenen Anbietern erworben werden. Die Hersteller bieten neben netzspezifischen Daten auch empirische Geschwindigkeiten aus Floating Car Data (FCD) an. Dadurch kann das Netzmodell für alle bzw. alle größeren Straßen mit real gemessenen Geschwindigkeiten versorgt werden, wodurch von einer sehr guten Routingqualität als Basis für Bereitstellung realistischer Reisezeiten ausgegangen werden kann. Deutschlandweite empirische Geschwindigkeiten werden auch von der Firma INRIX angeboten.

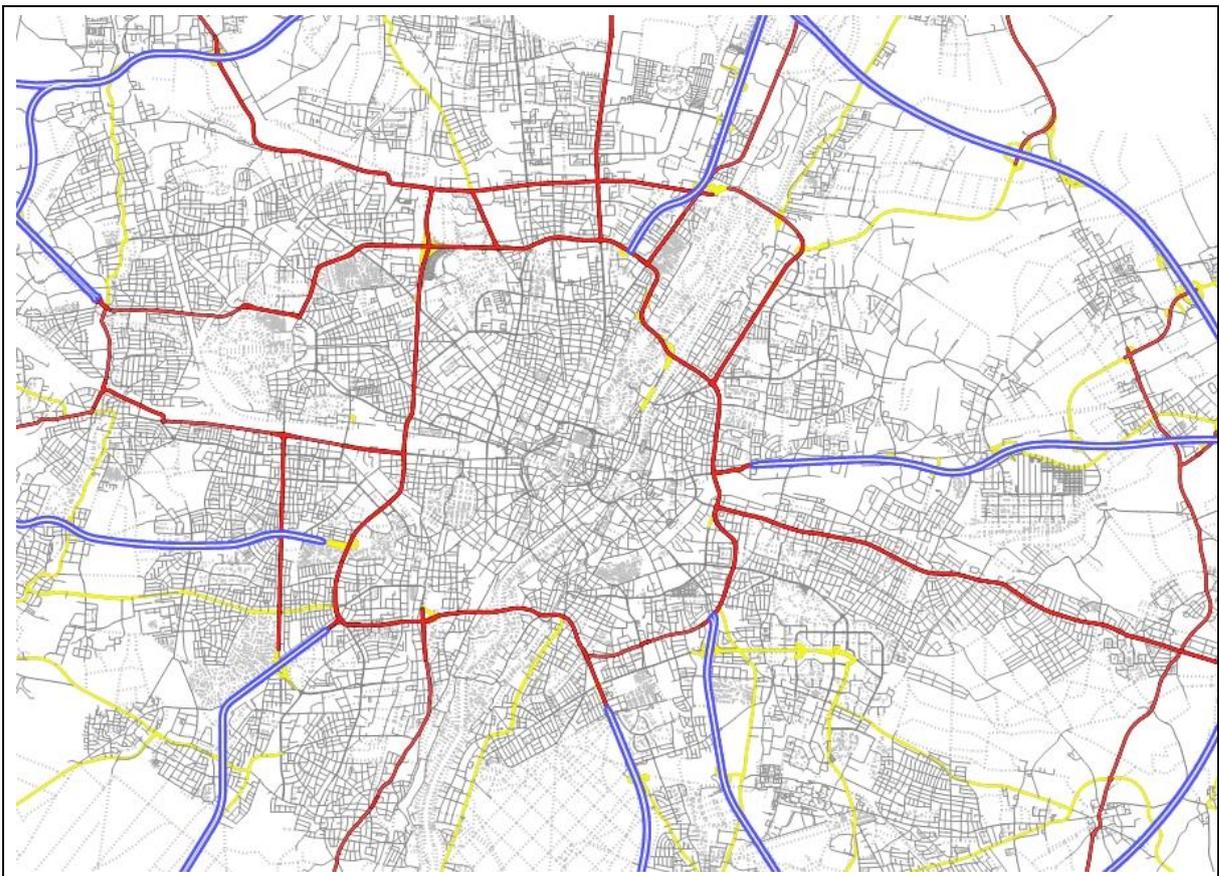


Abbildung 6-2: Ausschnitt aus HERE© Straßennetzkarte (2017-Q2, Darstellung in PTV Visum), alle Straßen sind Teil der Datenbasis.

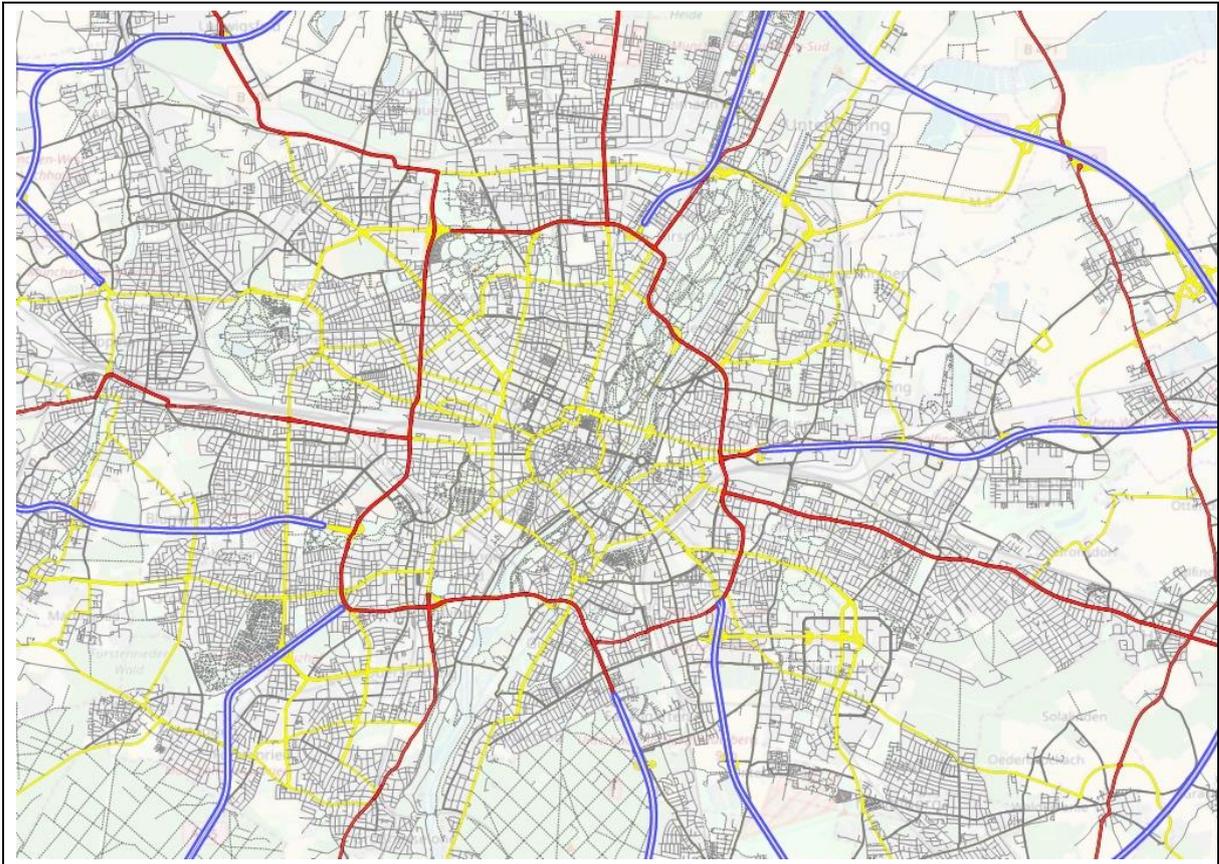


Abbildung 6-3: Ausschnitt aus TomTom© Straßennetzkarte (2017-06, Darstellung in PTV Visum), alle Straßen sind Teil der Datenbasis.

Alternativ zu den Daten der kommerziellen Hersteller können Netzdaten auch aus der OpenStreetMap (OSM) Datenbasis abgeleitet werden. OSM ist ein Projekt, das frei nutzbare Geodaten sammelt, strukturiert und unter einer Open Data Commons Open Database Lizenz (ODbL) für die Allgemeinheit zur Verfügung stellt. Daten aus OSM werden auch für Routinganwendungen verwendet. Die für die Verkehrsmodellierung notwendigen Informationen sind in Deutschland bei OSM in der Regel von guter Qualität, wobei es regionale Unterschiede geben kann. Die Daten können für einen frei wählbaren Netzausschnitt online bei <https://www.openstreetmap.org> heruntergeladen werden.

Ggf. stehen auch auf dem MDM-Portal<sup>11</sup> (MobilitätsDatenMarktplatz) Daten für das Untersuchungsgebiet zur Verfügung.

<sup>11</sup> <https://service.mdm-portal.de/mdm-portal-application/>

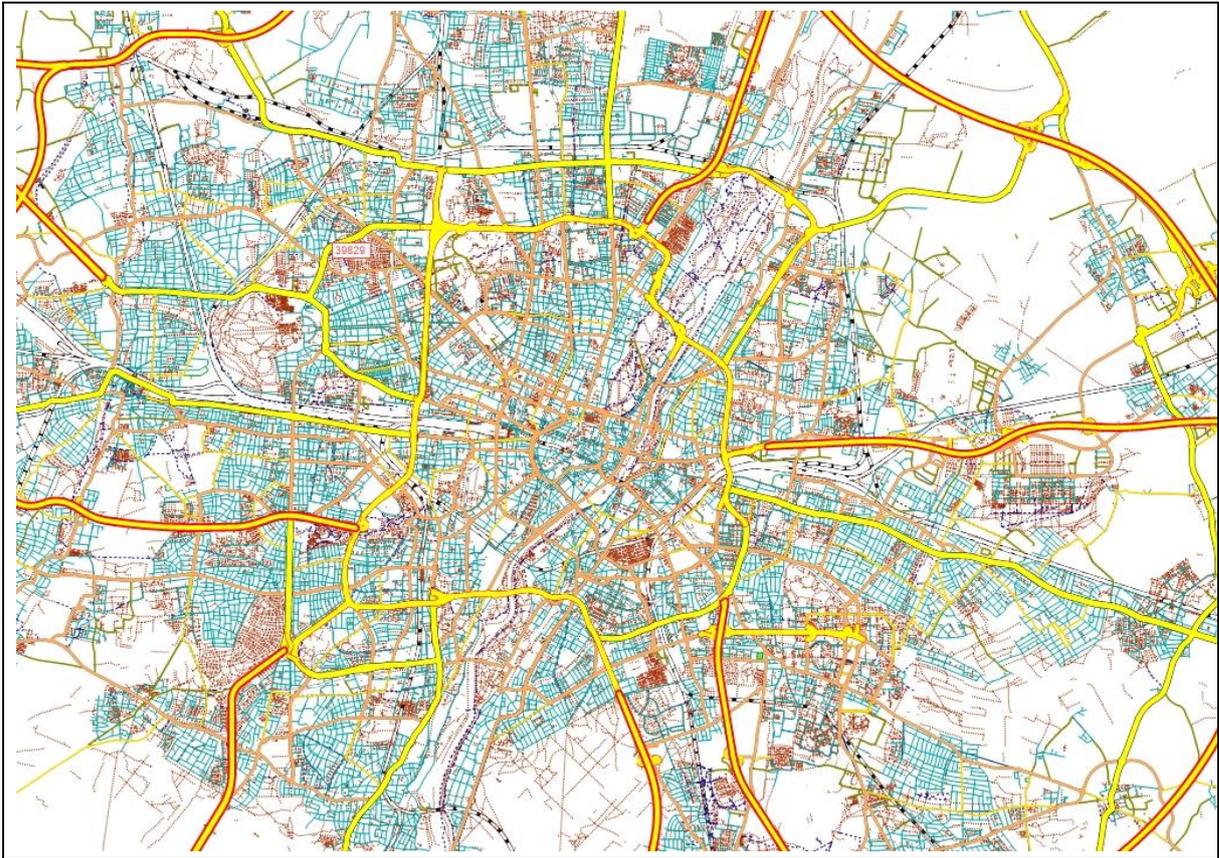


Abbildung 6-4: Ausschnitt aus OpenStreetMap Straßennetzkarte (2018-01, Darstellung in PTV Visum), alle Straßen sind Teil der Datenbasis.

### **Knotendaten (Topologie, Steuerung)**

Die Abschätzung von Fahrtzeitverlusten beim Überfahren eines Netzknotens kann in Verkehrsnachfragemodellen auf verschiedene Arten erfolgen, die sich im Datenbedarf unterscheiden:

- konstanter Zeitzuschlag,
- Zeitzuschlag in Abhängigkeit der Verkehrsstärke am Knoten auf einem Abbieger und
- Zeitzuschlag in Abhängigkeit der Knotentopologie und der Knotensteuerung.

Aufgrund des hohen Aufwands der Datenbeschaffung für eine genaue Berechnung der Zeitverluste am Knoten werden zumeist konstante Zeitzuschläge am Knoten in Verkehrsnachfragemodellen verwendet. Die Zeitzuschläge sollten in Abhängigkeit der Abbiegerichtung, des Knotentyps und der Streckenhierarchie der Quellstrecke und der Zielstrecke vergeben werden. Dazu sind die Informationen zu den Typen der Knoten im Netz notwendig. Eine typische Klassifizierung ist beispielsweise

- signalgesteuert,
- vorfahrtsgeregelt,
- unregelt (rechts vor links) und
- Kreisverkehr.

Die Knotentypen können in der Regel über den Auftraggeber beim städtischen Planungsamt beschafft werden. Die Informationen zur Hierarchie der Quell- und Zielstrecke und die Abbiegerichtung sind im

Netzmodell enthalten. Eine leistungsfähige Modellsoftware bietet die notwendige Funktionalität, um diese Informationen zur Knotenmodellierung automatisiert einsetzen zu können.

Falls die Zeitverluste mit Hilfe von Kapazitäten und Verkehrsstärken am Knoten berechnet werden sollen, sind Informationen zu den Kapazitäten notwendig. Um diese abschätzen zu können, müssen Informationen zu Grünzeiten, Umlaufzeiten und Knotentopologie (Anzahl Abbiegestreifen) beschafft werden. Planungsämter verfügen über diese Daten in verschiedenen Formaten. Die Kodierung dieser Information im Netzmodell ist jedoch aufwendig, fehleranfällig und schwer zu pflegen. Knotentopologien können auch über das Internet (z.B. Google Maps, Bing Maps) recherchiert werden.

Anbieter von Floating Car Data (FCD) haben angekündigt, künftig auch empirische Informationen zu Wartezeiten an Knoten anzubieten. Diese Informationen könnten verwendet werden, um Netzmodelle automatisiert mit realistischen Wartezeiten an Knoten zu versorgen und Knotenmodelle zu etablieren, die Wartezeiten an Planungsknoten genauer schätzen.

### **Ruhender Verkehr**

Wichtige Einflussfaktoren auf die Ziel- und Moduswahl in städtischen Gebieten sind die Verfügbarkeit und die Kosten von Parkraum. Da ein Verkehrsnachfragemodell die Veränderung der Auslastung von Parkplätzen und Parkhäusern über den Tag nicht berücksichtigen kann, muss die Verfügbarkeit mit Hilfe eines statischen Indikators ausgedrückt werden. Für die Definition und die Verwendung dieses Indikators hat sich in den Verkehrsnachfragemodellen noch kein einheitliches Verfahren entwickelt. Allerdings benötigt ein geeigneter Indikator in jedem Fall eine Abschätzung der Anzahl der öffentlich und privat verfügbaren Parkplätze je Verkehrszelle. Die Daten zu öffentlichen und privaten Parkplätzen können von den Planungsämtern der Städte bereitgestellt werden, bzw. durch Internetrecherche (Parkhäuser, Parkplätze) und durch Abschätzung über digitale Karten (z.B. Google Maps, Bing Maps) ermittelt werden. Ggf. stehen auch auf dem MDM-Portal<sup>11</sup> Daten für das Untersuchungsgebiet zur Verfügung.

Für die Einbeziehung der Parkkosten in die Entscheidungsmodelle eines Verkehrsnachfragemodells sind Informationen zu den Parkgebühren auf öffentlichen Parkplätzen und Parkhäusern nötig. In einem statischen Verkehrsnachfragemodell werden mittlere Parkzeiten je Wegezweck für die Berechnung der Parkkosten verwendet. Daher werden auf Basis der realen Parkkosten mittlere Parkkosten pro Stunde berechnet und im Modell hinterlegt. Die Daten der Parktarife können ebenfalls durch die Planungsämter der Städte bereitgestellt oder durch Internetrecherche ermittelt werden.

### **Prognosedaten**

Die Erstellung eines Straßennetzmodells für ein Prognosejahr muss in Abstimmung mit dem Auftraggeber des Verkehrsnachfragemodells erfolgen. Dazu muss geprüft werden, welche Netzveränderungen sich aus den geplanten Maßnahmen des Bundesverkehrswegeplans bzw. der daraus abgeleiteten Bedarfspläne und den Planungen auf der Ebene des Landes und des Kreises ergeben. Es sind alle Netzveränderungen im Netzmodell mit zulässigen Geschwindigkeiten und Fahrstreifenanzahl zu kodieren, die bis zum Prognosejahr umgesetzt sein werden.

### 6.1.2 Angebotsdaten des öffentlichen Verkehrs

Die Angebotsdaten des öffentlichen Verkehrs umfassen das Schienennetz, die Lage und den Namen der Haltestellen sowie vollständige Informationen zu den aktiven Linien am zu modellierenden Tag (z.B. Dienstag an Schultagen). Die Liniendaten müssen Daten zur Haltestellenfolge, der Fahrtzeit zwischen den Haltestellen und der Aufenthaltszeit an den Haltestellen enthalten. Falls im Modell eine fahrplanbasierte Umlegung verwendet werden soll, müssen auch die genauen Abfahrtszeiten an den Starthaltestellen der Linienfahrten bekannt sein, andernfalls sind Informationen zum Takt bzw. Abfahrten pro Zeitintervall ausreichend.

Während Daten zur Schieneninfrastruktur z.B. auch in OpenStreetMap (OSM) enthalten sind, müssen die anderen ÖV-Angebotsdaten ermittelt werden. Folgende Verfahren bzw. Quellen können genutzt werden:

- manuelle Kodierung auf Basis von Fahrplanheften,
- Nutzung von Daten aus der elektronischen Fahrplanauskunft,
- Nutzung von Daten aus der operativen Planung des Verkehrsbetriebs (z.B. Dienstplanung) und
- Verwendung von frei verfügbaren Daten im Format General Transit Feed Spezifikation (GTFS).

Die manuelle Kodierung von Fahrplandaten spielt eine immer kleinere Rolle, da die Digitalisierung der Fahrplandaten bei den Verkehrsanbietern in Deutschland sehr weit fortgeschritten ist. Sie wird allerdings häufig eingesetzt, um in den elektronischen Daten fehlende Informationen (z.B. Fahrten eines kleineren Verkehrsbetriebs) im Netzmodell zu ergänzen. Da Daten des Linien- und Fahrplanangebots recht komplex sind, ist für die Erfassung ein graphischer Netzeditor sehr zu empfehlen.

Fast alle Verkehrsräume und Verkehrsverbünde in Deutschland verfügen über eine elektronische Fahrplanauskunft. Diese Systeme enthalten in der Regel alle Daten, die für die Verkehrsnachfragemodellierung benötigt werden. In Einzelfällen fehlen genaue Lagedaten der Haltestellen in der Datenbasis. In diesem Fall kann die Lageinformation manuell nachkodiert werden oder aus anderen Datenquellen ergänzt werden. Die Daten können aus den Backend-Systemen in einem zumeist proprietären Format ausgegeben werden und müssen dann in der Regel in das Format der Modellsoftware übertragen werden. Es gibt Modellsoftware am Markt, die über Schnittstellen zu den Ausgabeformaten der Fahrplanauskunftssysteme verfügt.

In einem ÖV-Betrieb bilden die Fahrplandaten die Grundlage für verschiedene operative Planungssysteme wie z.B. die Fahr- und Dienstplanung und das rechnergestützte Betriebsleitsystem (RBL). Daher können auch diese Systeme analog zur Fahrplanauskunft die notwendigen Daten für die Modellierung des Verkehrsangebots im ÖV bereitstellen. Auch hier gilt, dass die Daten in der Regel nur in einem proprietären Format bereitgestellt werden und anschließend in das Format der Modellsoftware übertragen werden müssen.

Google hat mit der General Transit Feed Specification (GTFS; früher: Google Transit Feed) ein Standardformat für ÖV-Angebotsdaten geschaffen, um entsprechende Daten in Google Maps zu integrieren. Immer mehr Verkehrsbetriebe bzw. Verkehrsverbünde veröffentlichen Daten (z.B. der Verkehrsverbund Rhein Ruhr (VRS) oder die S-Bahn Stuttgart) in diesem Format. Durch Konvertierung

können die Daten in die Formate der Modellsoftware übertragen werden. Es gibt auch Software, die GTFS Daten direkt einlesen kann.

Ggf. stehen auch auf dem MDM-Portal<sup>11</sup> Daten für das Untersuchungsgebiet zur Verfügung.

### **Prognosedaten**

In der Regel liegen für die Abbildung des Angebots im Prognosejahr Betriebskonzepte für den Schienenverkehr, seltener für den Busverkehr, vor. Ein Betriebskonzept besteht aus dem Linienverlauf, den geplanten Fahrtzeiten und den Fahrtenhäufigkeiten. Die Betriebskonzepte müssen beim Aufgabenträger bzw. Verkehrsbetrieb abgefragt werden. Liegen für Teile des Netzes keine Betriebskonzepte vor, sollte das Angebot zunächst aus dem Analysejahr übernommen werden. Offensichtliche Anpassungen, z.B. Zubringer zur einer neuen S-Bahn Haltestelle, sollten vorgenommen werden.

Zumeist sind keine Daten zum genauen Fahrplan der neuen Angebote vorhanden. Falls im Analysefall die Kenngrößenmatrizen des ÖV-Angebots auf Basis der genauen Fahrplanlage berechnet wurden, muss für den Prognosefall ein Fahrplan mit einer ähnlichen Anschlussqualität erstellt werden.

### **6.1.3 Daten zum Radverkehrsnetz**

Die Nachfrage im Radverkehr wird schon immer in Verkehrsnachfragemodellen berechnet, die die gesamte Mobilität der Bevölkerung des Untersuchungsraums enthalten sollen. In der Regel werden die Reisezeiten im Radverkehr auf dem Netz für den Pkw-Verkehr unter Annahme einer konstanten Radgeschwindigkeit berechnet. Bei Verwendung einer modernen, leistungsfähigen Modellsoftware können die nur für den Pkw-Verkehr zugelassenen Strecken (Autobahnen, Autostraßen) für die Rad-Reisezeitberechnung gesperrt werden. Der Einfluss von Steigungen auf die Reisezeit und die Attraktivität der Radnutzung wird durch Zuschläge berücksichtigt. Reine Radwege (z.B. durch Parkanlagen oder entlang von Flüssen) werden in der Regel durch manuelle Nachkodierung im Netzmodell ergänzt.

Ggf. stehen auf dem MDM-Portal<sup>11</sup> Daten für das Untersuchungsgebiet zur Verfügung.

Der Stand der Forschung wurde in den letzten Jahren beispielsweise von Sener et al. [113; 114], Menghini et al. [88], Gasser et al. [70], Hood et al. [75] oder Broach et al. [17] erweitert. Dabei wurden wichtige Daten für eine Berechnung der Qualität der Radnutzung im Verkehrsnetz untersucht wie z.B. der Radwegtyp, der Straßenbelag, die Sicherheit oder die Luftqualität entlang des Weges.

Aus heutiger Sicht können folgende Quellen für genauere Daten zur Modellierung des Radnetzes genannt werden:

- für Höhendaten (z-Koordinaten):
  - kommerzielle Netzanbieter,
  - digitale Geländemodelle,
  - LIDAR-Höhenmessungen (Lasermessungen von einem Satelliten / Space Shuttle) der ESA oder der NASA.

- für den Radwegtyp:
  - städtische Ämter,
  - Luftbilder, Google Streetview.
- für den Sicherheitsaspekt:
  - parallele Busverkehre: aus dem ÖV-Netzmodell,
  - Verkehrsstärke: aus der IV-Umlegung,
  - Parken am Straßenrand: Luftbilder, städtische Behörden.

### **Prognosedaten**

Das Planungsnetz des Radverkehrs besteht aus den Veränderungen des Straßennetzes (Kapitel 6.1.1) und ggf. aus Veränderungen bei den reinen Radwegen. Vorhandene Planungen müssen mit dem Auftraggeber abgestimmt und im Prognosenetz eingepflegt werden.

#### **6.1.4 Daten für die Verkehrszelleneinteilung**

Verkehrszellen beschreiben die räumliche Auflösung eines Verkehrsnachfragemodells. Sie fassen mehrere Verkehrsquellen bzw. -ziele zusammen, wobei der Aggregationsfehler durch diese Zusammenfassung möglichst gering ausfallen soll. Dies wird umso besser erreicht, je ähnlicher die Zugangszeiten und Zufahrten zu den Nutzungen innerhalb der Verkehrszellen sind.

Um Verkehrszellen zu erstellen, die diese Anforderung so weit wie möglich erfüllen, sind folgende Daten erforderlich:

- Flüsse, Gebirge und sonstige geomorphologische Hindernisse,
- Flächen, die nicht durch ein Straßennetz erschlossen sind, wie Naturschutzgebiete, land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen,
- viel befahrene Straßen, Autobahnen, Eisenbahnstrecken und
- Straßennetz, ÖV-Haltepunkte.

Daten zu den Flächen können z.B. aus dem Flächennutzungsplan, OpenStreetMap (OSM) und aus verschiedenen anderen Quellen (z.B. kommerzielle Kartenanbieter) ermittelt werden.

Verkehrszellen sollten auch administrative Gebietseinteilungen berücksichtigen. Für städtische Modelle sind hier Gemeindegrenzen, Stadtteile und statistische Bezirke zu nennen. Die Daten hierzu sollten durch die jeweilige Stadt bereitgestellt werden können.

Schließt der Einflussraum Teile des europäischen Auslands mit ein, kann auf sogenannte NUTS- oder LAU-Gebiete<sup>12</sup> von Eurostat<sup>13</sup> zurückgegriffen werden. Es ist zu beachten, dass aufgrund der unterschiedlichen Struktur der Verwaltungseinheiten in den einzelnen Nationalstaaten der

---

<sup>12</sup> NUTS: Nomenclature of territorial units for statistics; LAU: Local Administrative Unit

<sup>13</sup> <https://ec.europa.eu/eurostat/web/regions-and-cities/overview>

Detailierungsgrad auf der gleichen Ebene voneinander abweichen kann. So beschreibt die NUTS 3-Ebene in Deutschland beispielsweise kleinere räumliche Einheiten als in Frankreich.

### **Prognosedaten**

Es kann sein, dass für den Aufbau des Prognosemodells die Verkehrszelleneinteilung verfeinert werden muss, falls sich Zugangszeiten bzw. Zufahrten im Prognosemodell verändern. Im besten Fall wird diese Verfeinerung schon im Analysemodell durchgeführt.

## **6.2 Daten zur Bevölkerung und Flächennutzung im Untersuchungsraum (Siedlungsstrukturdaten)**

Verkehr entsteht durch die räumliche Trennung von Aktivitäten, die Menschen im Alltag ausüben müssen oder wollen. Daher ist eine möglichst gute Datenbasis bezüglich der Demografie und der Flächennutzung grundlegend für die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells. Die entsprechenden Daten werden in der Folge Siedlungsstrukturdaten genannt. In einem Verkehrsnachfragemodell wird der Verkehr, der im betrachteten Zeitraum in einer Verkehrszelle entsteht (Quellverkehr) bzw. von den in der Verkehrszelle vorhandenen Flächennutzungen angezogen wird (Zielverkehr), im Teilschritt Verkehrserzeugung berechnet.

Dabei ist zwischen Daten zu unterscheiden, die direkt in die Modellrechnung eingehen, wie

- Einwohner,
- Arbeitsplätze oder
- Ausbildungsplätze

und Daten, die zunächst über Faktoren in wirksame Attraktionsgrößen umgerechnet werden müssen, wie

- Einkaufsflächen nach Sortiment,
- Ämter / Behörden,
- Ärzte oder
- Kultureinrichtungen.

Verkehrsnachfragemodelle unterscheiden sich zumeist in der Modellierung der Wegezwecke. So werden Einkaufswege und Freizeitwege häufig aggregiert und nicht weiter differenziert berechnet. Da die Verkehrserzeugung (z.B. die Zahl der Wege pro Tag) für ein Einzelhandelsgeschäft bezogen auf die Fläche des Geschäfts vom Sortiment abhängt (z.B. Möbelgeschäft vs. Lebensmitteldiscounter), ist auch für diese aggregierten Modelle eine disaggregierte Ermittlung der Siedlungsstrukturdaten notwendig, um die Attraktionsgrößen für jede Verkehrszelle möglichst genau zu berechnen.

Siedlungsstrukturdaten können entweder bezogen auf räumliche Einheiten (Verkehrszelle, statistischer Bezirk, Stadtteil, Gemeinde) oder adressscharf vorliegen. Für die Verwendung der Daten in einem Verkehrsnachfragemodell müssen alle Daten durch geeignete Datenverarbeitungsschritte auf der Ebene der Verkehrszellen bereitgestellt werden. In der Folge werden mögliche Datenquellen für die

benötigten Siedlungsstrukturdaten eines Verkehrsnachfragemodells genannt. Es ist zu beachten, dass die Datenverfügbarkeit einer dynamischen Entwicklung (Digitalisierung der Datenerhebung, Open Data Initiative) unterliegt und sich die hier genannten Daten daher in Zukunft hinsichtlich ihrer Qualität, Umfang und ihrer Quelle verändern werden.

### 6.2.1 Einwohnerdaten

Einwohnerdaten werden differenziert nach Altersklassen und Geschlecht für alle Verkehrszellen benötigt. In der Regel arbeiten Verkehrsnachfragemodelle auf Basis von verhaltenshomogenen Gruppen wie z.B. Erwerbstätige, Rentner oder Schüler. Die Umrechnung der Daten nach Altersklassen und Geschlecht in verhaltenshomogene Gruppen wird mit Hilfe von Faktoren vorgenommen, die aus Mobilitätshebungen (siehe Kapitel 6.3) gewonnen werden können. Die Einteilung der Altersklassen sollte sich daher an Altersgrenzen orientieren, die zu einer möglichst guten Zuordnung zu den verhaltenshomogenen Gruppen führt (z.B. 6-10 Jahre, 10-17 Jahre, 18-25 Jahre, 26-64 Jahre, ...).

Die Einwohnerdaten können entweder aus behördlichen Quellen oder aus kommerziellen Quellen bereitgestellt werden. Die behördlichen Quellen greifen auf die Daten der Einwohnermeldeämter zu und sind daher sehr aktuell und genau. In der Regel werden über den Auftraggeber der Modellerstellung der zuständigen Behörde die Daten zur notwendigen räumlichen Auflösung (Verkehrszellenpolygone) übergeben und die Behörde wertet die Datensätze entsprechend aus und ordnet sie den Verkehrszellen zu.

Die kommerziellen Anbieter von Einwohnerdaten können diese Daten bezüglich einer beliebigen räumlichen Auflösung bereitstellen. Es ist also möglich, dem Anbieter eine Verkehrszelleneinteilung in üblichen GIS-Formaten zu übergeben und der Datenanbieter liefert die Einwohner nach Altersklassen und Geschlecht für diese Verkehrszellen. Die maximale räumliche Auflösung variiert je nach Anbieter – die kleinste räumliche Einheit ist in der Regel der Wohnblock / das Wohnquartier oder der Straßenzug, je nach Art der Information geht es bis hin zu adressscharfen Informationen auf Hausebene.

Die feinträumigen Daten der kommerziellen Anbieter sind in Regel mit aggregierten Daten von amtlichen Statistiken abgeglichen. Die Herkunft und die Vorgehensweise bei der Ableitung der feinträumigen Informationen wird von den Anbietern jedoch nicht im Detail veröffentlicht, so dass eine qualitative Bewertung der Verfahren nicht durchgeführt werden kann. Daher ist eine Prüfung der Daten hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit amtlichen Quellen auf der kleinstmöglichen aggregierten Ebene (z.B. Stadtteile) und auch eine stichprobenhafte Überprüfung der feinträumigen Daten zur Sicherung der Datenqualität notwendig.

Neben den Einwohnerdaten je Verkehrszelle werden für die Erstellung der Modelldatenbasis der Siedlungsstrukturdaten auch Informationen zur Pkw-Verfügbarkeit und zum ÖV-Zeitkartenbesitz benötigt. Die Daten zur Pkw-Verfügbarkeit können über verschiedene Quellen abgeleitet werden. Falls eine Haushaltsbefragung für den Untersuchungsraum verfügbar ist und die Pkw-Verfügbarkeit abgefragt wurde, kann die Pkw-Verfügbarkeit bei der Ermittlung der Verteilung der Einwohner auf Personengruppen räumlich differenziert berücksichtigt werden. Die gleiche Verfahrensweise kann für die Berücksichtigung des Zeitkartenbesitzes angewendet werden.

Die Pkw-Verfügbarkeit im Untersuchungsraum kann aber auch mit Hilfe von Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) abgeleitet werden. Dazu kann das Planungsamt der Stadt beim Bundesamt die Kfz-Meldezahlen für den Untersuchungsraum räumlich differenziert nach Kfz-Typenklassen abfragen. Bei den vom Bundesamt bereitgestellten Daten können allerdings Privatfahrzeuge von Geschäftsfahrzeugen in der Regel nicht unterschieden werden. Geschäftsfahrzeuge sind am Firmensitz gemeldet, der zumeist nicht mit dem Wohnort des Nutzers identisch ist. Dadurch ist Berechnung der räumlichen Pkw-Verfügbarkeit der Einwohner im Untersuchungsraum erschwert.

Informationen zu Zeitkarteninhabern des ÖV können auch von den Verkehrsverbänden bzw. Verkehrsbetrieben zur Verfügung gestellt werden, wenn sie im Rahmen von Verkehrserhebungen erfasst wurden.

### **Prognosedaten**

Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und das Statistische Bundesamt erstellen demographische Prognosen für Deutschland auf der Ebene der Länder. Im Zuge der Bundesverkehrswegeplanung wird eine demographische Prognose (Regionalisierte Strukturdatenprognose 2030 [101]) auf Ebene der Kreise und differenziert nach Altersklassen und Geschlecht vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) bereitgestellt. Aktuell ist das die Prognose für das Jahr 2030. Die Daten werden auf der Webseite der Clearingstelle Verkehr des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt beschrieben<sup>14</sup> und können dort bestellt werden. Die demographische Entwicklung innerhalb der Kreise auf der Ebene der Verkehrszellen muss durch die Gemeinde selbst vorgenommen werden. Dabei sollten Neubaugebiete und Nachverdichtungsgebiete beachtet werden (Flächennutzungsplan).

Die Entwicklung der Pkw-Verfügbarkeit und des ÖV-Zeitkartenbesitz im Untersuchungsraum können über ein Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodell geschätzt werden. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob die jeweilige Stadt durch verkehrspolitische Maßnahmen Einfluss auf die durch Demographie und Angebot bestimmte natürliche Marktentwicklung nehmen will.

Für Prognosen zum Motorisierungsgrad und zur Entwicklung der Verkehrsleistung kann auch auf bundesweite Untersuchungen zurückgegriffen werden (z.B. die Shell-PKW-Szenarien bis 2030 [115] oder bis 2040 [116]) oder die gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr des BMVI [119]). Auch diese Angaben müssen anhand der bisherigen Entwicklung der Daten des KBA (Bestand der Kfz nach Gemeinden zum 1. Januar jedes Jahres) hinsichtlich der konkreten lokalen Anwendbarkeit geprüft werden, da es gravierende regionale Unterschiede geben kann.

### **6.2.2 Arbeitsplatzdaten**

Die Modellierung des Berufsverkehrs ist eine zentrale Aufgabe eines Verkehrsnachfragemodells. Dabei ist die Verwendung von möglichst genauen Arbeitsplatzdaten je Verkehrszelle eine wichtige Voraussetzung für die Qualität des Modells. In Deutschland gibt es leider keine einheitliche aktuelle Quelle von räumlich hochaufgelösten Daten zu Arbeitsplätzen in Städten. Daher müssen diese Daten

---

<sup>14</sup> <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/275/>

aus verschiedenen Quellen zusammengetragen werden und für jede Stadt muss ein eigener Modelldatensatz erstellt werden. Wichtige Quellen für Arbeitsplatzdaten sind z.B.:

- Daten der Bundesagentur für Arbeit (BA) zu Arbeitsorten der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten je Gemeinde,
- Daten der BA zu Arbeitsorten der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten je statistischen Bezirk,
- Daten zu Mitgliedsfirmen der örtlichen Industrie- und Handelskammer (IHK) und Handwerkskammer,
- Daten der statistischen Landesämter zu Gesamtbeschäftigtenzahlen je Gemeinde,
- lokale Daten zu Behördenstandorten,
- lokale Daten zu Standorten von wichtigen Firmen,
- Anbieter von Geodaten.

Die BA verfügt über Daten zu Wohn- und Arbeitsorten der in Deutschland gemeldeten sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten, d.h. ohne Beamte, Selbstständige, geringfügig Beschäftigte und helfende Familienmitglieder. Diese Daten können aggregiert für Gemeinden bei der BA bezogen werden. Die BA kann diese Daten auf Antrag von Gebietskörperschaften auch auf Ebene von statistischen Bezirken von Gemeinden bereitstellen. Die gelieferten Daten unterliegen immer den Datenschutzgesetzen der Bundesrepublik Deutschland, wodurch Daten, die auf kleinen Fallzahlen beruhen, nicht übermittelt werden. Neben den kleinen Fallzahlen haben diese Daten folgende Einschränkungen:

- es werden nur Einpendler aus dem Ausland, jedoch keine Auspendler aus dem Inland erfasst,
- es wird nicht zwischen täglichen Pendlern und Wochenendpendlern unterschieden, da Erst- und Zweitwohnsitz nicht differenziert werden,
- bei Arbeitgebern mit mehreren Niederlassungen kann es zu regionalen Falschzuordnungen kommen, da die zugeordneten spezifischen Betriebsnummern häufig nicht übermittelt werden.

Löwa [85] stellt eine Methodik vor, mit der die BA Pendlerdaten aufbereitet werden können.

Eine weitere Möglichkeit, Daten zu Beschäftigten am Arbeitsort für eine Gemeinde zu erhalten, sind die Mitgliederverzeichnisse der örtlichen IHK bzw. Handwerkskammer. Diese Daten enthalten die Adressen der Betriebe, deren Branchenzugehörigkeit und die Mitarbeiterzahl als Größenklasse. Häufig ist die Qualität dieser Daten unzureichend. Die exakte Zahl der Mitarbeiter kann nur aus der angegebenen Größenklasse geschätzt werden. Außerdem sind hier in der Regel keine Daten zu Betriebsstätten enthalten, sondern zum Firmensitz, wodurch die Daten zu Firmen mit verteilten Betriebsstätten entsprechend über eigene Recherche oder andere Quellen aufbereitet werden müssen.

Einige statistische Landesämter veröffentlichen auf ihren Internetseiten Daten zu Beschäftigten nach Wirtschaftssektoren. Die Daten stammen aus dem Arbeitskreis Erwerbstätigenrechnung des Bundes und der Länder und liegen für Stadt- und Landkreise vor.

Das deutsche Unternehmensregister ermöglicht einen zentralen Zugang zu den Informationen aus dem Handelsregister, dem Partnerschaftsregister und dem Genossenschaftsregister. Daten (Zahl der Arbeitsplätze, Zahl der Betriebe nach Wirtschaftssektoren) aus dem Unternehmensregister können auf

der Internetseite der Regionaldatenbank Deutschland<sup>15</sup> für Kreise und kreisfreie Städte abgerufen werden. Ob die Daten auch in einer feineren räumlichen Auflösung bereitgestellt werden können, ist unbekannt.

Daten zu Beschäftigten der in einer Stadt ansässigen Behörden (Bund, Land und Kommunal) sollten individuell in Kooperation mit Hilfe des Auftraggebers recherchiert werden. Dies kann über eine Internetrecherche oder auch direkten Kontakt zu den Behörden erfolgen. Dies gilt ebenfalls für die Daten der Beschäftigten von großen und bekannten Arbeitgebern.

Bei Anbietern von Geodaten (z.B. Nexiga GmbH, Microm GmbH) können räumlich hochaufgelöste Daten zu sozialversicherungspflichtig Beschäftigten am Arbeitsort bzw. Erwerbstätigen am Arbeitsort, segmentiert nach 14 Wirtschaftszweigen erworben werden. Es ist möglich, diese Daten bei den Anbietern für eine vorgegebene räumliche Einteilung (Verkehrszellen) zu bestellen. Es wird empfohlen, diese Daten mit den Daten der statistischen Ämter bzw. Daten der BA auf einer aggregierten Raumeinteilung (z.B. Gemeinden) abzugleichen und ggf. die kommerziellen Daten der Geodatenanbieter auf die amtlichen Kenngrößen hochzurechnen.

### **Prognosedaten**

Eine Prognose der Arbeitsplätze nach Kreisen wird ebenfalls im Rahmen der Regionalisierten Strukturdatenprognose der Bundesverkehrswegeplanung [101] erstellt. Auch hier muss die Feinverteilung von der Gemeinde selbst durchgeführt werden bzw. sollten der Flächennutzungsplan und vorhandene Bebauungspläne analysiert werden. Insgesamt sollte bei der Aufstellung der Siedlungsstrukturdatenbasis überprüft werden, ob sich durch die Strukturdatenprognose Veränderungen der Pendlerströme zum Umland des Modellgebiets bzw. innerhalb des Modellgebiets ergeben.

### **6.2.3 Daten zum Wirtschaftsverkehr**

Zur Modellierung des Wirtschaftsverkehrs werden Siedlungsstrukturdaten für Wirtschaftsverkehrssegmente benötigt. Für eine Unterscheidung nach Gutarten oder Wirtschaftszweigen müssen entsprechend differenzierte Siedlungsstrukturdaten verwendet werden. Im einfachsten Fall, bei nur einem Wirtschaftsverkehrssegment, entfällt diese Differenzierung. Die Kompatibilität der Siedlungsstrukturdaten mit den Verhaltensdaten (siehe Kapitel 6.3) muss beachtet werden. Es existieren verschiedene Arten von Siedlungsstrukturdaten für den Wirtschaftsverkehr:

- Daten zu Arbeitsplätzen (nach Gutart / Wirtschaftszweig),
- Daten zur Flächennutzung (nach Gutart / Wirtschaftszweig),
- Daten zu Betrieben (nach Gutart / Wirtschaftszweig),
- Daten zum Fahrzeugbestand im Wirtschaftsverkehr.

Daten zu Arbeitsplätzen stellen für die Modellierung des Wirtschaftsverkehrs eine wichtige Datengrundlage zur Ermittlung von Quell- und Zielverkehrsaufkommen dar. Die bereits in Kapitel 6.2.2

---

<sup>15</sup> <https://www.regionalstatistik.de>

erläuterten Quellen können verwendet werden. Es sollte eine Klassifikation der Arbeitsplätze nach Gutart / Wirtschaftszweig beachtet bzw. vorgenommen werden, um später ein differenziertes Wirtschaftsverkehrsverhalten abbilden zu können. Bereits klassifizierte Daten folgen häufig der WZ-Klassifikation [121] des statistischen Bundesamtes (siehe Tabelle 5-22 auf Seite 128). Liegen keine direkten Daten zu Arbeitsplätzen vor, kann eine Ermittlung der räumlichen Verteilung von Arbeitsplätzen indirekt über Arbeitsplatzdichten und Flächennutzung nach Gutart / Wirtschaftszweig erfolgen. Siedlungsstrukturdaten zu Betrieben, wie z.B. Frachtaufkommen oder Fahrzeugbestand, können auch zur Ermittlung von Quell- und Zielverkehrsaufkommen verwendet werden. Es muss geprüft werden, ob flächendeckend vergleichbare Siedlungsstrukturdaten vorliegen. Mögliche Bezugsquellen entsprechen denen der Arbeitsplatzdaten. Daten zum Fahrzeugbestand auf einer überbetrieblichen, räumlichen Ebene können ebenfalls der Berechnung von Quell- und Zielverkehrsaufkommen von Verkehrszellen dienen. Quellen für diese Datengrundlage bieten die Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) und kommunaler Kfz-Zulassungsbehörden.

Eine umfangreiche Übersicht zu Datenquellen im Wirtschaftsverkehr findet sich bei Leerkamp et al. [82] oder in den FGSV-Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen des Wirtschaftsverkehrs [43].

### **Prognosedaten**

Die Entwicklung der Daten zum Wirtschaftsverkehr muss hinsichtlich der aggregierten Entwicklung der Arbeitsplatzzahlen abgestimmt werden. Die Feinverteilung im Untersuchungsraum kann nur in Abstimmung mit der Gemeinde unter Verwendung des Flächennutzungsplans und unter Einbeziehung von Kenntnissen zur Ansiedlung bzw. Schließung von Gewerbebetrieben erfolgen.

Für Prognosen zur Entwicklung der Verkehrsleistung kann zudem auf bundesweite Untersuchungen zurückgegriffen werden (z.B. Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) [119]).

### **6.2.4 Daten zu Schul- und Ausbildungsplätzen**

Die Daten zu Schul- und Ausbildungsplätzen gehen ähnlich wie Arbeitsplatzdaten direkt in die Verkehrserzeugungsrechnung des Modells ein. In der Regel werden für die Modellrechnungen die Kategorien Grundschüler, Schüler an weiterführenden Schulen, Schüler an Berufsschulen und Studenten unterschieden. Datenquellen sind:

- Schulplätze nach Schultyp: offizielle Daten zu den Schulen in Deutschland gibt es bei den statistischen Landesämtern und
- Daten zu örtlichen Hochschulen: Internet, eigene Recherche vor Ort.

Die Daten der Statistischen Landesämter enthalten Adresse, Schultyp, Anzahl Lehrer und Anzahl Schüler. Die Daten können mit Hilfe von Geocoding-Verfahren automatisiert den Verkehrszellen zugewiesen werden.

Die Daten zu den örtlichen Hochschulen können in der Regel selbst recherchiert werden. Es ist wichtig, dass alle Standorte der Hochschulen erfasst werden und die Zahl der durchschnittlich an einem Standort anwesenden Studierenden abgeschätzt wird.

## Prognosedaten

Aus der Bevölkerungsprognose, die nach Altersklassen vorliegt, kann die Anzahl der Schüler für das Prognosejahr geschätzt werden. Aus den Planungen zu neuen Schulstandorten, Standorterweiterungen bzw. Standortschließungen (siehe dazu die jeweiligen Schulentwicklungspläne) im Modellraum ergibt sich für jede Schule eine Schülerzahlprognose. Wichtig ist auch hier, dass die räumliche Zuordnung von Schülern am Wohnort und Schulstandorten mit ihren Schulplätzen geprüft wird, um die Berechnung von unrealistisch langen Schulwegen zu vermeiden.

### 6.2.5 Daten zum Einkaufen

Um die Verkehrsanziehung einer Verkehrszelle bezüglich des Einkaufsverkehrs abschätzen zu können, müssen die in den Verkehrszellen befindlichen Einzelhandelsgeschäfte erfasst werden. Für die Abschätzung des täglichen Kundenpotentials wird in der Regel die Branchenzuordnung (gemäß Bosserhoff [12]) und die Fläche des Geschäfts herangezogen. Diese Daten können aus verschiedenen Quellen ermittelt werden:

- Crowdsourcing-Daten (z.B. OpenStreetMap – OSM),
- Daten von kommerziellen Anbietern oder
- regionale Gutachten zu Einkaufsstandorten.

Die OSM-Datenbasis enthält auch viele Points-of-Interest (POI), die allerdings häufig schlecht oder unvollständig typisiert sind, sodass eine manuelle Aufbereitung der Daten mit Einkaufsstandorten notwendig ist. Die OSM-Daten enthalten keine Daten zu Verkaufsflächen. Daher müssen die Verkaufsflächen anhand der OSM-Bezeichnung und Annahmen zu mittleren Verkaufsflächen abgeschätzt werden.

Anbieter von digitalen Netzdaten für Navigationsgeräte bieten auch POI-Daten als Sonderziele für die Fahrzeugnavigation an. Diese Daten sind vergleichbar zu den OSM-POI, da sie ebenfalls keine Daten zu Verkaufsflächen enthalten. Die Daten erhalten allerdings eine konsistente Kategorisierung, die für eine Zuordnung zu Branchen genutzt werden kann.

Anbieter von Geodaten können Adressdaten von Einzelhandelsgeschäften inklusive deren Verkaufsflächen liefern.

Einige Städte haben Einzelhandelsgutachten erstellt. Für diese Gutachten wird der Bestand an Einzelhandelsgeschäften in der Stadt erfasst und dokumentiert. Daher sind diese Gutachten eine gute Basis für die Bereitstellung von Daten für die Verkehrsnachfragemodellierung.

Eine Vorabschätzung von Kundenbesuchen pro Tag kann dann mit Hilfe der Faktoren von Bosserhoff [12] durchgeführt werden. Die Software „Ver\_Bau“ [12], dem diese Faktoren zugrunde liegen, wird zur Abschätzung der Verkehrserzeugung durch Vorhaben der Bauleitplanung genutzt. Es ist in Deutschland, Österreich, Liechtenstein, der Schweiz, Frankreich, Luxemburg, den Niederlanden, der Tschechischen Republik, Polen und Island im Einsatz. Es berücksichtigt die Abschätzungsmethodik gemäß der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung, das relevante Regelwerk der FGSV in Deutschland ("Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen" [48]) sowie das

Regelwerk bzw. Forschungsergebnisse in Österreich. Bei der Nutzung dieser Faktoren ist die Aktualität der Datenbasis zu prüfen.

Bezugsnummer	Kategorie	Verkaufsfläche (Kunden / m <sup>2</sup> )
1	Aldi / Lidl	2,25
2	Discounter	1,6
3	SB-Läden	2,15
4	Supermarkt bis 800 qm	1,15
5	Nahrungs- und Genussmittel	1,5
6	Bäcker / Metzger	3,33
7	Drogerie / Hygieneartikel	1,39
8	Parfümerie / Kosmetik	2,13
9	Apotheken	5

Tabelle 6-1: Beispielfaktoren nach Bosserhoff [12].

### Prognosedaten

Die Entwicklung von Einzelhandelsstandorten lässt sich nur schwer abschätzen. Daher werden in der Regel die Daten aus dem Analysejahr für die Prognose übernommen. Falls größere Veränderungen von Einzelhandelsstandorten bis zum Prognosejahr für den Modellraum beim Auftraggeber bekannt sind, sollten sie mit der gleichen Systematik wie in der Analyse in die Strukturdatenprognose eingepflegt werden. Sollten in der Bevölkerungsprognose z.B. größere Gebiete mit starker Einwohnerzunahme hinterlegt sein, kann die Eröffnung dazu passender Einzelhandelsgeschäfte angenommen werden.

### 6.2.6 Freizeitverkehr und private Erledigung

Auch bei der Modellierung der Wegezwecke Freizeit und private Erledigung existiert keine eindeutige Strukturvariable, die die Verkehrsanziehung einer Verkehrszelle beschreiben kann. Diese Wegezwecke sind sehr heterogen, denn sie umfassen unterschiedliche Segmente, die sich sowohl in den Zielen aber auch in der Tageszeit unterscheiden. In den meisten Modellen werden die Ziele des Freizeit- und Erledigungsverkehrs deshalb nur ungenau über vorhandene Strukturmerkmale wie Einwohner oder auch Einkaufsflächen modelliert. Um die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells zu verbessern, wird empfohlen den Freizeit- und Erledigungsverkehr mit Hilfe verschiedener Segmente zu erfassen:

- Gruppe 1: Arzt, Bank, Post, Behörden, etc.,
- Gruppe 2: Restaurant, Kultur,
- Gruppe 3: Besuche, Krankenhaus,
- Gruppe 4: Sport, Grünanlagen,
- Gruppe 5: Bringen / Holen.

Die dazu notwendigen Daten für die Gruppen 1 und 2 können, ähnlich wie beim Einkaufen, aus den folgenden Quellen ermittelt werden:

- Crowdsourcing-Daten (z.B. OpenStreetMap – OSM),
- Daten von kommerziellen Anbietern und

- regionale Gutachten zu Einkaufsstandorten.

Als Strukturgrößen für Besuche werden die Einwohner in jeder Verkehrszelle angesetzt. Als Strukturgröße für die Verkehrserzeugung von Krankenhäusern kann die Bettenzahl verwendet werden. Die Lage der Krankenhäuser im Untersuchungsraum und deren Bettenzahl kann durch Internetrecherche ermittelt werden. Man kann davon ausgehen, dass auch die OSM-Datenbasis und die Daten von Anbietern von digitalen Straßenkarten POI-Daten der Krankenhäuser eines urbanen Untersuchungsraums enthalten.

Die Lage von Sporteinrichtungen (Sportplätze, Hallen u.ä.) kann ebenso über Eigenrecherche bzw. teilweise über POI-Daten ermittelt werden. Parks, Grünanlagen und Naherholungsgebiete lassen sich durch Auswertungen von Luftbildern ermitteln.

Die Strukturgrößen für Bringen / Holen setzen sich in der Regel aus Kindergärten und Bahnhöfen zusammen. Die Daten zur Lage und Größe der Kindergärten sollten bei den örtlichen Behörden vorliegen.

Ähnlich wie beim Einzelhandel müssen die Strukturgrößen für jede Kategorie in wirksame Verkehrserzeugungsraten umgerechnet werden, um dann alle Segmente zusammenfassen zu können. Auch hier ist die erwartete Besucherzahl pro Tag ein geeigneter Bezugswert. Der jeweilige Gesamtwert für die im Untersuchungsraum lebenden Personen kann Mobilitätserhebungsdaten (Verhaltensdaten, siehe Kapitel 6.3) entnommen werden.

### **Prognosedaten**

Hier sollte analog zur Prognose von Einzelhandelsgeschäften vorgegangen werden: grundsätzliche Übernahme der Daten aus der Analyseberechnung, Einarbeitung der bekannten Veränderungen nach der in der Analyse angewendeten Methodik und ggf. Annahme von zusätzlichen Standorten bei Gebieten mit großen Einwohnerzuwächsen (z.B. Ärzte, Banken, Restaurants und Grünanlagen).

## **6.3 Daten zum Mobilitätsverhalten der Bevölkerung im Untersuchungsraum**

Die Verhaltensdaten für ein Verkehrsnachfragemodell werden aus Mobilitätserhebungen gewonnen. Mobilitätserhebungen werden in der Regel als Haushaltsbefragungen mit Wegetagebüchern durchgeführt. Die „Empfehlungen für Verkehrserhebungen“ (EVE) [53] bzw. deren Ergänzung „Hinweise für die Durchführung von Haushaltsbefragungen zum Mobilitätsverhalten“ [57] der FGSV enthalten Empfehlungen und Hinweise für die Durchführung von Haushaltsbefragungen. Auch hier ist aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung von einer dynamischen Entwicklung der Erhebungs- bzw. Befragungsdurchführung auszugehen (z.B. App-basierte Erhebungen).

Die Daten einer Mobilitätserhebung werden zum einen direkt als Eingangsdaten für das Verkehrsnachfragemodell verwendet, zum anderen dienen sie zur Kalibrierung und Validierung. Direkte Eingabedaten sind z.B.:

- spezifische Mobilitätsraten (Quell- und Zielverkehrsaufkommensraten) bzw. Wegekettenhäufigkeiten,

- Daten zu Aufkommensraten für die verwendeten Siedlungsstrukturdaten (siehe Kapitel 6.2.3) im Wirtschaftsverkehr,
- Daten zu Tourencharakteristiken im Wirtschaftsverkehr,
- Daten zur zeitlichen Verteilung der Mobilität (Ganglinien),
- Daten zur Verteilung der Einwohner auf die verhaltensähnlichen Gruppen oder
- Gesamtwegemengen für Einkaufs- und Freizeitverkehre.

Für die Kalibrierung und Validierung werden folgende Daten verwendet:

- mittlere Reiseweiten und Reiseweitenverteilungen,
- Marktanteile der Verkehrsmodi.

Eine Haushaltsbefragung sollte auf Basis wissenschaftlicher Methoden durchgeführt, statistisch gewichtet und hochgerechnet werden, um eine optimale Repräsentativität der Ergebnisse zu erhalten. Da eine Haushaltsbefragung immer auf Basis einer Stichprobe der Gesamtbevölkerung durchgeführt wird, sollten der Stichprobenfehler und die Konfidenzintervalle der Mittelwerte ausgewertet und in der Modellkalibrierung berücksichtigt werden.

Aufgrund eingeschränkter Zeit- und Finanzbudgets wird nicht für jede Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells eine Mobilitätserhebung durchgeführt. In diesem Fall kann auf die Daten der Mobilitätserhebung „Mobilität in Deutschland“ (MiD, [91])<sup>16</sup> zurückgegriffen werden. Im Wirtschaftsverkehr kann u.a. auf die Güterkraftverkehrsstatistik [128] des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) und die Erhebung „Kraftverkehr in Deutschland“ (KiD, [99]) zurückgegriffen werden. Die MiD wird regelmäßig im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) durchgeführt. Seit Februar 2019 sind die Daten für die 2017 durchgeführte Erhebung verfügbar. Viele Städte (z.B. München), Verkehrsverbünde und -betriebe haben den vom BMVI für die entsprechende Stadt bzw. Region vorgesehenen Stichprobenumfang der MiD aufgestockt und dadurch eine für diese Stadt / Region spezifische Befragungsdatenbasis hergestellt. Diese spezifischen Daten wurden dem jeweiligen Auftraggeber vom BMVI übergeben. Die regulären Daten der MiD enthalten als Ortsbezug einen regionalstatistischen Raumtyp (17 Kategorien), wodurch ein Datensatz nicht einer bestimmten Stadt zugeordnet werden kann.

Die Daten einer Mobilitätserhebung mit Wegetagebüchern enthalten das an den Stichtagen beobachtete Mobilitätsverhalten, das vom Verkehrsangebot zum Erhebungszeitpunkt beeinflusst wird. Mit diesen empirischen Daten lassen sich viele der in einem Verkehrsnachfragemodell enthaltenen Parameter der Entscheidungsmodelle (Aktivitätenwahl, Zielwahl, Moduswahl) schätzen. Parameter, die sich aus Wegetagebüchern nicht ableiten lassen, können zum Teil aus Stated-Preference (SP) Befragungen bestimmt werden. SP-Befragungen erfassen Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden in hypothetischen Situationen. Das können Situationen sein, die im aktuellen Zustand für einen Befragten nur selten vorkommen (z.B. gutes ÖPNV-Angebot) oder Werte, die die Befragten schwer quantifizieren können (z.B. Kosten einer Fahrt). Auch die Reaktion auf neue, erst in der Zukunft

---

<sup>16</sup> Die MiD kann beim Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) bezogen werden:  
<http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/datenbezug.html>

vorhandene Modi (z.B. App-basierte On-Demand Verkehre) kann in einer SP-Befragung ermittelt werden.

Das Design (Fragebogeninhalt) dieser Befragungen muss durch ein komplexes statistisches Verfahren berechnet werden, wozu Spezialsoftware (z.B. SAS, SPSS, Biogeme oder Alogit) benötigt wird. Mit diesen Softwaresystemen wird auch die statistische Schätzung der Parameter durchgeführt. Aus Kostengründen wird in Deutschland in der Regel auf die Durchführung einer SP-Befragung verzichtet. Die Parameter werden dann durch den Modellersteller bestimmt. In diesem Fall sollten die Parameter durch Plausibilitätsüberlegungen und Sensitivitätsrechnungen validiert werden.

### **Prognosedaten**

Die Verhaltensdaten bleiben in der Regel für die Prognoseberechnung unverändert. Variablen, die neue Angebote beschreiben, die es erst zum Prognosezeitpunkt gibt, sollten bereits in der Nutzenfunktion des Analysezustands enthalten sein.

## **6.4 Daten zum Verkehrsablauf im Netz (Verkehrsstärken und Fahrtzeiten)**

Ein zentrales Ergebnis eines Verkehrsnachfragemodells sind Verkehrsstärken und Fahrtzeiten des motorisierten Individualverkehrs auf Strecken und Fahrgastzahlen im Netz des ÖPNV. Diese berechneten Ergebnisse müssen zur Modellvalidierung mit empirischen Daten verglichen werden (siehe Kapitel 8.7). Zusätzlich werden diese Daten auch häufig für eine Korrektur der Matrizen verwendet (siehe Kapitel 5.1.10).

### **6.4.1 Kfz-Verkehrsstärken (Dauerzählstellen, SVZ, Einzelzählungen)**

Verkehrsstärken für die Strecken im Netzmodell werden entweder als Stichprobenerhebung für bestimmte Tage oder mit Hilfe von festinstallierten Geräten (Dauerzählstellen) permanent gemessen.

Auf den deutschen Autobahnen und Bundesstraßen wird von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein Netz von Dauerzählstellen unterhalten. Die Ergebnisse dieser Zählungen werden von der BASt<sup>17</sup> veröffentlicht und können dort heruntergeladen werden. Die Verkehrsmengendaten dieser automatisierten Dauerzählstellen werden in einem standardisierten Format zur Verfügung gestellt, dem sogenannten BASt-Bestandsbandformat (Version 2004) [20]. Dieses Format basiert auf der Fahrzeugklassifizierung nach den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS, Ausgabe 2002) [19]<sup>18</sup>. Wie in Tabelle 6-2 zu sehen ist, werden die Fahrzeuge hierbei entweder gar nicht klassifiziert oder in 2 Klassen, 5 Klassen (und die nicht klassifizierbaren Fahrzeuge) oder 8 Klassen (und die nicht klassifizierbaren Fahrzeuge) eingeteilt. Laut TLS 2012 [23] können die Fahrzeugklassen für die statistische Auswertung von Geschwindigkeitsdaten in 3 Klassen unterschieden werden.

---

<sup>17</sup> <http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html>

<sup>18</sup> Die aktualisierten Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS, Ausgabe 2012) [23] haben die identische Klassifizierung.

1 Klasse	2 Klassen	5+1 Klassen	8+1 Klassen
Alle Kraftfahrzeuge	Pkw-Ähnliche: <ul style="list-style-type: none"> <li>• nicht klassifizierbare Fahrzeuge</li> <li>• Motorräder</li> <li>• Pkw</li> <li>• Lieferwagen bis 3,5t</li> </ul>	nicht klassifizierbare Fahrzeuge	nicht klassifizierbare Fahrzeuge
		Pkw-Gruppe: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Motorräder</li> <li>• Pkw</li> <li>• Lieferwagen bis 3,5t</li> </ul>	Motorräder
			Pkw
	Lkw-Ähnliche: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pkw mit Anhänger</li> <li>• Lkw</li> <li>• Lkw mit Anhänger</li> <li>• Sattelkraftfahrzeuge</li> <li>• Busse</li> </ul>	Pkw mit Anhänger	Pkw mit Anhänger
		Lkw	Lkw
		Lkw (Fahrzeugkombinationen): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lkw mit Anhänger</li> <li>• Sattelkraftfahrzeuge</li> </ul>	Lkw mit Anhänger
			Sattelkraftfahrzeuge
		Busse	Busse

Tabelle 6-2: Fahrzeugklassifizierung des BAST-Bestandsbandformats nach [20].

Die BAST führt zudem regelmäßig eine bundesweite Straßenverkehrszählung (SVZ, zuletzt 2015) durch. Die Ergebnisse der SVZ 2015 können bei der BAST<sup>19</sup> abgerufen werden.

Viele deutsche Städte führen regelmäßig und systematisch Verkehrszählungen im städtischen Straßennetz durch. Dies sind zumeist Stichprobenzählungen für ein oder mehrere Tage. Die Daten können bei den städtischen Ämtern abgefragt werden. Zum Teil werden sie im Rahmen von Open Data frei im Internet zur Verfügung gestellt (z.B. Stadt Köln<sup>20</sup>).

Es ist auch möglich, Detektordaten aus modernen, bedarfsabhängig gesteuerten Lichtsignalanlagen zu erhalten.

Bei allen Daten sollte die Qualität und die statistische Sicherheit geprüft werden. Manuelle Zählungen können Fehler durch schlechte Erfassung oder Überforderung des Zählpersonals enthalten. Maschinelle Zählungen können durch Ausfälle oder Erkennungsfehler fehlerhaft sein.

Die Zählstellen sollten im Netzmodell des Verkehrsnachfragemodells verortet werden, um sie mit den Modellergebnissen abgleichen bzw. für Kalibrierungsverfahren einsetzen zu können.

#### 6.4.2 Kfz-Fahrtzeitdaten

Die berechneten Reisezeiten sind eine wichtige Kenngröße für die Wahlmodelle eines Verkehrsnachfragemodells. Daher sollten die Reisezeiten mit empirisch erhobenen Reisezeiten abgeglichen werden und das Modell bei größeren Abweichungen angepasst werden. Um diese empirischen Reisezeiten bereitzustellen, gibt es z.B. folgende Möglichkeiten:

- Durchführung von Befahrungen,
- Erhebungen mit Messgeräten (ANPR (= Automatische Nummernschilderkennung), Bluetooth),
- Verwendung von Floating Car Data (FCD).

Floating Car Data können bei kommerziellen Anbietern üblicherweise in Form von aggregierten Reisezeit- bzw. Geschwindigkeitsdaten erworben werden. Dabei werden mit GPS gemessene Fahrzeugbewegungen auf ein Streckennetz referenziert und aus allen Befahrungen eines

<sup>19</sup> <http://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/Manuelle-Zaehlung.html>

<sup>20</sup> <https://offenedaten-koeln.de/dataset/kfz-zaehlstellen-und-werte-koeln>

Streckenabschnitts Mittelwerte gebildet. Die Anbieter bieten zum einen Daten in Form von Geschwindigkeitsganglinien je Wochentag an, die über einen Zeitraum von 1-2 Jahren ermittelt werden, und erlauben zum anderen die Auswahl der Daten für individuell definierbare Tage bzw. Tagesgruppen. So kann ein einzelner Tag oder ein Datumsbereich ausgewählt werden (z.B. vom 1.7.2017 bis zum 31.8.2017). Tage eines Datumsbereichs, die nicht ausgewertet werden sollen, können individuell ausgeschlossen werden. Die zeitliche Aggregation der Daten ist in der Regel frei wählbar. So können Auswertungen auf Basis von Wochentagen oder Wochentagsgruppen (z.B. alle Montage oder alle Werktage im ausgewählten Zeitraum) und Tageszeitabschnitten (z.B. zwischen 7 und 8 Uhr) beauftragt werden. Bei einigen Anbietern ist eine zeitliche Auflösung bis zu minutenfeinen Daten möglich, aber aufgrund begrenzter Stichprobengrößen meist nicht sinnvoll. Eine Unterscheidung der Fahrzeugklasse auf der Grundlage von GPS-Daten ist schwierig. Dennoch bieten einige Anbieter wenigstens näherungsweise eine nach Fahrzeugklassen differenzierte Auswertung an, da die Flottenzusammensetzung bei manchen GPS-Datenquellen bekannt ist. Es wird allerdings meist nur grob zwischen „größtenteils Lkw“ bzw. „größtenteils Pkw“ unterschieden. Die Daten werden entweder für alle Strecken eines Gebiets oder für ausgewählte Routen geliefert. Je nach Anbieter werden verschiedene statistische Kennwerte geliefert, hier seien Perzentile, (harmonische oder arithmetische) Mittelwerte, Stichprobengrößen und Standardabweichungen genannt.

Ggf. stehen auf dem MDM-Portal<sup>11</sup> Daten für das Untersuchungsgebiet zur Verfügung.

### 6.4.3 ÖV-Erhebungs- und Zähldaten<sup>21</sup>

Für die Kalibrierung und Validierung der Umlegungsberechnung des ÖV werden empirische Nachfragedaten benötigt. Diese können aus den folgenden Quellen kommen:

- ÖV-Nachfrageerhebungen,
- Daten zu Ein- und Aussteiger und
- Daten aus Check-in und Check-out Systemen.

Verkehrsverbände führen in regelmäßigen Abständen Erhebungen der ÖV-Verkehrsnachfrage durch, um die Einnahmeaufteilung zwischen den verschiedenen Verkehrsbetrieben innerhalb des Tarifverbands festzulegen. Diese Erhebungen beinhalten die Ermittlung von Matrizen nach Reisezwecken sowie Ein- und Aussteigerzählungen. Zu beachten ist, dass die Erhebungen als Stichprobenerhebungen durchgeführt werden und daher entsprechende statistische Fehler enthalten.

Verkehrsbetriebe erfassen regelmäßig die Nachfrage in ihrem Netz für die Liniennetzplanung und Linienleistungsberechnung. Dies wird häufig mit Hilfe von automatischen Zählgeräten durchgeführt. Die Daten werden in der Regel für die Modellerstellung zur Verfügung gestellt.

Elektronische Check-in- und Check-out-Systeme für die Fahrkartvalidierung sind in Deutschland bisher nur in wenigen Städten im Einsatz. Aus diesen Systemen können Einsteiger- (Check-In) oder Matrixdaten (Check-In und Check-out) bereitgestellt werden.

---

<sup>21</sup> Bei Erhebungen werden Fahrgäste befragt. Bei Zählungen werden Fahrgäste lediglich gezählt.

Zähl- bzw. Erhebungsdaten des Fernverkehrs der Deutschen Bahn oder anderer Betreiber werden von den Betreibern in der Regel nicht für den Aufbau von städtischen bzw. regionalen Verkehrsmodellen zur Verfügung gestellt.

#### **6.4.4 Erhebungs- und Zähldaten im Rad- und Fußgängerverkehr**

In den letzten Jahren haben einige Städte Zählungen von Radverkehrsstärken (z.B. Stadt Köln und Stadt München) und Fußgängerfrequenzen durchgeführt. Um die Nutzung von Radrouten zu erfassen, werden GPS-Tracks, die mit Mobilfunkgeräten erhoben wurden, ausgewertet. Diese Daten können in Zukunft ebenfalls für die Überprüfung von Verkehrsnachfragemodellen eingesetzt werden. Allerdings ist hier auch immer die statistische Sicherheit der erfassten Daten zu ermitteln.

### **6.5 Verkehrsnachfragedaten, die nicht vom Verkehrsnachfragemodell berechnet werden (externe Matrizen)**

Ein Verkehrsnachfragemodell berechnet die Mobilität der Wohnbevölkerung bzw. von Wirtschaftstreibenden im Untersuchungsraum. Alle Fahrten und Wege mit Quelle oder Ziel oder beiden außerhalb des Untersuchungsraums, werden nicht durch das Verkehrsnachfragemodell berechnet und müssen aus externen Quellen bereitgestellt werden. Diese externen Quellen können sein:

- Matrizen der Bundesverkehrswegeplanung [78],
- Matrizen aus einem Landesverkehrsmodell,
- Nachfragedaten kommerzieller Anbieter.

Die Matrizen der Bundesverkehrsplanung können bei der Clearingstelle Verkehr des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)<sup>22</sup> bestellt werden. Sie enthalten die Verkehrsnachfrage pro Jahr in Personenfahrten zwischen den Kreisen in Deutschland, segmentiert nach Reisezwecken und Modi (Pkw- und ÖV-Fahrten).

Einige Bundesländer betreiben Verkehrsnachfragemodelle für die Verkehrsplanung auf Landesebene. Diese Modelle enthalten Verkehrsumlegungen für MIV und ÖV. Aus diesen Umlegungen kann die Verkehrsnachfrage für ein geeignetes Teilnetz (z.B. Untersuchungsraum einer Stadtregion) abgeleitet werden.

In Deutschland gibt es auch private Betreiber von Verkehrsnachfragemodellen. Bei diesen Anbietern können für beliebige Gebiete in Deutschland Matrizen bestellt werden.

Neben Nachfragedaten aus übergeordneten Modellen können Daten aus Statistiken bezogen und aus Erhebungen gewonnen bzw. genutzt werden. Informationen zu bestehenden Verflechtungen zwischen Wohn- und Arbeitsplätzen enthält z.B. die Pendlerstatistik der Bundesagentur für Arbeit (BA, siehe Kapitel 6.2.2). Für jede Gemeinde in Deutschland wird erfasst, wie viele sozialversicherungspflichtig Beschäftigte dort mit Erstwohnsitz gemeldet sind und aus welcher Gemeinde wie viele der dort sozialversicherungspflichtig Angestellten stammen. Diese Daten können durch geeignete

---

<sup>22</sup> <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/276/>

Hochrechnungsverfahren korrigiert und als Validierungsgröße der modellierten Arbeitswege herangezogen werden. Hierbei muss beachtet werden, dass die Pendlerstatistik ausschließlich Pendlerströme von sozialversicherungspflichtig Beschäftigten enthält, Beamte und Selbstständige sind beispielsweise nicht enthalten. Zusätzlich können Personen, deren hauptsächlicher Aufenthaltsort nicht dem Erstwohnsitz entspricht, die Statistik verfälschen, z.B. Wochenendpendler oder bei den Eltern gemeldete Studierende, die eine sozialversicherungspflichtige Tätigkeit durchführen. Dieser Fehler lässt sich nur zum Teil durch eine Plausibilisierung der täglichen Pendelrelationen entfernen.

Erhobene Nachfragedaten können z.B. aus Kordonbefragungen, ANPR-Systemen oder Mobilfunkdaten stammen. Bei all diesen Datenquellen ist ein Hochrechnungsverfahren anzuwenden, welches die Schiefe der Stichprobe in Betracht zieht.

### **Prognosedaten**

Matrizen für ein Prognosejahr (aktuell 2030, [78]) liegen auch für die Bundesverkehrswegeplanung vor und können beim DLR bezogen werden. Falls ein Verkehrsnachfragemodell auf Landesebene verfügbar ist, kann die Prognosematrix für MIV und ÖV aus diesem Modell übernommen werden.

## 7 Anforderungen an die Modellierungssoftware

Verkehrsnachfragemodelle werden von den Modellerstellern mit Hilfe einer Modellierungssoftware implementiert. Das validierte Modell wird dann von Modellanwendern unter Nutzung der Modellierungssoftware für die Zwecke der Verkehrsplanung eingesetzt. Dieses Kapitel formuliert Anforderungen an eine Modellierungssoftware und empfiehlt eine Vorgehensweise für ein Softwareupdate.

Im Rahmen dieses Projektes wurde zudem eine Checkliste für Modellierungssoftware erstellt (siehe Anlage 3).

### 7.1 Checkliste Modellierungssoftware

Tabelle 7-1 gibt einen Überblick über wichtige Anforderungen an eine Modellierungssoftware. Anlage 3 enthält eine umfassende Checkliste für die Modellierungssoftware. Diese Checkliste kann entweder genutzt werden, um die Anforderungen eines zu erstellenden Verkehrsnachfragemodells an eine Modellierungssoftware zu dokumentieren oder um die Eigenschaften verschiedener Produkte zu vergleichen. Die Checkliste unterscheidet fünf Bereiche einer Modellierungssoftware:

- Allgemeine Eigenschaften der Modellierungssoftware:  
Welchen Funktionsumfang bietet die Software? Gibt es eine Dokumentation?
- Methoden zur Bearbeitung der Eingangsdaten:  
Mit welchem Methoden wird der Anwender der Software bei der Bearbeitung von Verkehrsangebotsdaten unterstützt?
- Methoden zur Berechnung der Nachfrage:  
Welche Methoden bietet die Software, um eine Nachfrageberechnung durchzuführen und ein Nachfragemodell zu kalibrieren?
- Methoden zur Auswertung der Modellergebnisse:  
Mit welchem Methoden wird der Anwender der Software bei der Auswertung der Modellergebnisse unterstützt?
- Schnittstellen zum Austausch von Daten:  
Welche Schnittstellen bietet die Software, um Daten zu importieren und exportieren? Gibt es eine Programmierschnittstelle, mit der Berechnungsabläufe automatisiert werden können?

Die Checkliste soll sicherstellen, dass bei der Wahl einer Modellierungssoftware alle wichtige Anforderungen eines zu erstellenden Verkehrsnachfragemodells berücksichtigt werden.

Methoden zur Bearbeitung der Daten	<p>Erforderliche Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein Netzeditor zum Bearbeiten der Netzelemente (Verkehrszellen, Strecken, ÖV-Linien).</li> <li>• Ein Matrixeditor zum Bearbeiten und Auswerten von Nachfragematrizen und Kenngrößenmatrizen.</li> </ul> <p>Wünschenswerte Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein Fahrplanneditor, wenn die Bearbeitung von Fahrplänen für Prognosezustände wichtig ist.</li> <li>• Ein Szenariomanager mit dem verschiedene Szenariozustände verwaltet, berechnet und ausgewertet werden können.</li> </ul>
Methoden zur Berechnung der Nachfrage	<p>Erforderliche Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle Methoden zur Berechnung der Verkehrsnachfrage im Personenverkehr.</li> <li>• Alle Methoden zur Berechnung der Verkehrsnachfrage im Wirtschaftsverkehr.</li> <li>• Umlegung im IV: mindestens deterministisches Nutzergleichgewicht.</li> <li>• Umlegung im ÖV: mindestens ein takt- oder fahrplanbasiertes Verfahren.</li> <li>• Eine Rückkopplung zwischen Verkehrsnachfrage und Umlegung sollte automatisch ohne manuellen Eingriff möglich sein.</li> </ul> <p>Wünschenswerte Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eine intermodale Umlegung, bei der fahrplangebundene und fahrplanungebundene Verkehrssysteme kombiniert werden.</li> <li>• Ein integriertes Matrixkorrekturverfahren.</li> <li>• Methoden zur Parameterschätzung für die Ziel- und Moduswahl sind wünschenswert. Hierfür stehen aber auch andere Programme zur Verfügung.</li> </ul>
Methoden zur Auswertung der Modellergebnisse	<p>Erforderliche Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Darstellung der Modellergebnisse in grafischer Form als Belastungspläne, Knotenstrompläne und Differenzdarstellungen.</li> <li>• Darstellung der Modellergebnisse in Form von Listen für jedes Netzelement.</li> <li>• Erstellung von Verkehrsspinnen.</li> </ul> <p>Wünschenswerte Methoden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstellung von Isochronen</li> <li>• Häufigkeitsverteilungen, z.B. Reisezeitverteilung</li> </ul>
Schnittstellen	<p>Erforderliche Datenschnittstellen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Text, CSV, XML</li> <li>• Datenbank</li> <li>• GIS oder Shapefile</li> <li>• ÖV-Fahrplandaten</li> </ul> <p>Die Software sollte eine Programmierschnittstelle anbieten, über die Abläufe automatisiert werden können.</p>
Dokumentation	<p>Erforderliche Dokumentation:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Programmbedienung</li> <li>• Berechnungsmethoden</li> </ul> <p>Wünschenswert:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hotline</li> </ul>

Tabelle 7-1: Anforderungen an eine Modellierungssoftware.

## 7.2 Auswahl einer Modellierungssoftware in einer Ausschreibung (Anhang)

### 7.3 Vorgehen bei einem Softwareupdate

Jedes Softwareprodukt wird weiterentwickelt. Eine neuere Softwareversion kann mit der Vorgängerversion aus zwei Gründen nicht kompatibel sein:

- Die neue Version unterstützt frühere Datenstrukturen oder Methoden nicht mehr. In diesem Fall müssen die Inputdaten und ggf. auch Auswerteroutinen angepasst werden.
- Die neue Version liefert bei gleichen Inputdaten veränderte Ergebnisse. Ursache hierfür sind in der Regel Korrekturen bei den Berechnungsmethoden (Bug-Fix).

Veränderte Modellergebnisse sind immer dann problematisch, wenn die Modellergebnisse veröffentlicht wurden oder an Dritte weitergegeben wurden oder reproduzierbar sein müssen. Ein Modellnutzer kann beispielsweise für ein Projekt die Untersuchung eines weiteren Planfalls benötigen. Die Ergebnisse können dann aber nicht mehr mit dem Bezugsfall verglichen werden, da sich ein Teil der Ergebnisänderungen aus dem Softwareupdate ergibt.

### Durchführung und Archivierung eines Modellierungsprojekts

Für die Durchführung und Archivierung eines Modellierungsprojekts ist folgende Vorgehensweise zu empfehlen:

- Im Laufe eines Modellierungsprojektes sollte auf ein Softwareupdate verzichtet werden.
- Um Modellergebnisse eines Modellierungsprojektes reproduzieren zu können, sollte die Softwareversion, mit der die Ergebnisse berechnet wurden, archiviert werden.
- Bei großen und wichtigen Modellierungsprojekten kann es sinnvoll sein, das Modell zusammen mit der Software und einem Rechner, auf dem die Software und das Modell installiert ist, zu archivieren. Auch Änderungen des Betriebssystems oder der Rechnerarchitektur können Modellergebnisse, z.B. aufgrund von Rundungsvorschriften, verändern. Und ältere Softwareversionen sind auf neueren Betriebssystemen u.U. nicht mehr lauffähig.

### Update einer Modellimplementierung

Um eine vorhandene Modellimplementierung an eine neue Softwareversion anzupassen, sollten ähnlich wie beim Vergleich zweier Szenarien „Software alt“ und „Software neu“ vorgegangen werden:

- Der Analysefall oder ein geeigneter Bezugsfall des Verkehrsnachfragemodells, der mit der bisherigen (alten) Softwareversion berechnet wurde, stellt das Szenario 1 „Software alt“ dar.
- Der Zustand aus Szenario 1 wird nun mit der neuen Softwareversion berechnet. Es ergibt sich ein Szenario 2 „Software neu“.
- Für den Vergleich der beiden Szenarien, werden die in Tabelle 7-2 beschriebenen Tests in der dargestellten Reihenfolge durchgeführt. Liefert ein Test Ergebnisse ohne Abweichungen, dann können die folgenden Tests entfallen.

- Gibt es Abweichungen zwischen den Szenarien, dann müssen die Ursachen nach Möglichkeit verstanden und analysiert werden. Es muss entschieden werden, ob das Verkehrsnachfragemodell in der veränderten Form übernommen werden kann oder ob eine Anpassung des Modells (Modellparameter, Eingangsdaten) erforderlich ist.

Nr.	Test	Mögliche Ursachen bei Abweichungen der Ergebnisse	Wirkung
1	Vergleich der Verkehrsstärken IV und ÖV auf Streckenebene.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Das Umlegungsverfahren oder die Widerstandsberechnung haben sich geändert.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Andere Ergebnisse bei den Verkehrsstärken.</li> <li>• Es werden sich veränderte Kenngrößenmatrizen ergeben.</li> <li>• Die Nachfragematrizen werden sich unterscheiden.</li> </ul>
2	Vergleich der Verkehrsstärken der IV-Umlegung auf Streckenebene mit den Nachfragematrizen aus Szenario 1 (Software alt).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Das Umlegungsverfahren oder die Widerstandsberechnung haben sich geändert.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Andere Ergebnisse bei den IV-Verkehrsstärken.</li> </ul>
3	Vergleich der Verkehrsstärken einer Bestwegumlegung der Pkw-Matrix.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Widerstände von Strecken oder Knoten werden anders berechnet.</li> <li>• Die Software hat die Streckennetzdaten in veränderter Form übernommen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es werden sich veränderte Kenngrößenmatrizen ergeben.</li> <li>• Die Nachfragematrizen werden sich unterscheiden.</li> </ul>
4	Vergleich der Kenngrößenmatrix Pkw-Reisezeit im unbelasteten Netz.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Widerstände von Strecken oder Knoten werden anders berechnet.</li> <li>• Die Software hat die Streckennetzdaten in veränderter Form übernommen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Andere Ergebnisse bei der Ziel- und Moduswahl.</li> </ul>
5	Vergleich der Kenngrößenmatrix ÖV-Reisezeit.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Das Umlegungsverfahren oder die Widerstandsberechnung haben sich geändert.</li> <li>• Die Software hat die Fahrplandaten in veränderter Form übernommen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Andere Ergebnisse bei der Ziel- und Moduswahl.</li> </ul>

Tabelle 7-2: Empfehlung für eine Folge von Tests zum Vergleich der Ergebnisse eines Softwareupdates. Liefert ein Test Ergebnisse ohne Abweichungen, dann können die folgenden Tests entfallen.

## 8 Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen

Die Grundlagentexte dieses Kapitels basieren auf dem SVI-Forschungsprojekt „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen“ [107] und einer Veröffentlichung aus dem DFG-Forschungsprojekt „Einflussgrößen auf die Qualität von makroskopischen Nachfragemodellen im Personenverkehr“ [68], die durch Mitglieder der Forschungsgruppe bearbeitet wurden.

### 8.1 Vorgehensweise bei einer Qualitätssicherung

Verkehrsplaner nutzen Verkehrsnachfragemodelle, um die Wirkungen von zukünftigen Entwicklungen und geplanten verkehrlichen oder raumplanerischen Maßnahmen zu quantifizieren. Dabei soll das eingesetzte Modell valide Ergebnisse liefern, auf deren Grundlage planerische Entscheidungen getroffen werden können. Ein Verkehrsnachfragemodell wird als gut bezeichnet, wenn für den heutigen Zustand beobachtete und berechnete Werte möglichst gut übereinstimmen und wenn es Wirkungszusammenhänge zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage realitätsnah abbilden kann.

Um eine angemessene Güte eines Verkehrsnachfragemodells zu gewährleisten, ist eine möglichst standardisierte Qualitätssicherung erforderlich. Die Qualitätssicherung bei der Nachfragemodellierung ist kein einmaliger Verfahrensschritt, sondern ist ein Prozess, der in alle Stufen der Modellerstellung eingebunden werden sollte. Abbildung 8-1 gibt einen Überblick über den Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells, dessen Arbeitsschritte in den folgenden Abschnitten beschrieben werden. Dabei werden folgende Begriffe verwendet:

- **Verifizierung:**  
Vorgang, bei dem eine unabhängige Person überprüft, ob zwischen Modellbesteller und Modellersteller vereinbarte Vorgaben tatsächlich umgesetzt wurden.
- **Überprüfung:**  
Allgemeiner Begriff für die Kontrolle von Eingangsdaten und Ergebnisdaten.
- **Parametereinstellung:**  
Festlegung der Modellparameter durch eine Schätzung oder eine Setzung.
- **Kalibrierung:**  
Anpassen der Modellparameter, so dass die mit dem Modell berechneten Werte möglichst gut mit der beobachteten Realität übereinstimmen.
- **Validierung:**  
Überprüfung der Modellparameter, der Modellergebnisse und des Modellverhaltens mit geeigneten Gütemaßen und Tests.

Im Folgenden werden zuerst allgemeine Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle formuliert. Dann werden Gütemaße zur Überprüfung von Modellwerten und Messwerten vorgestellt und die Arbeitsschritte einer Qualitätssicherung beschrieben. Dabei werden konkrete Anforderungen an die Modellgüte benannt.

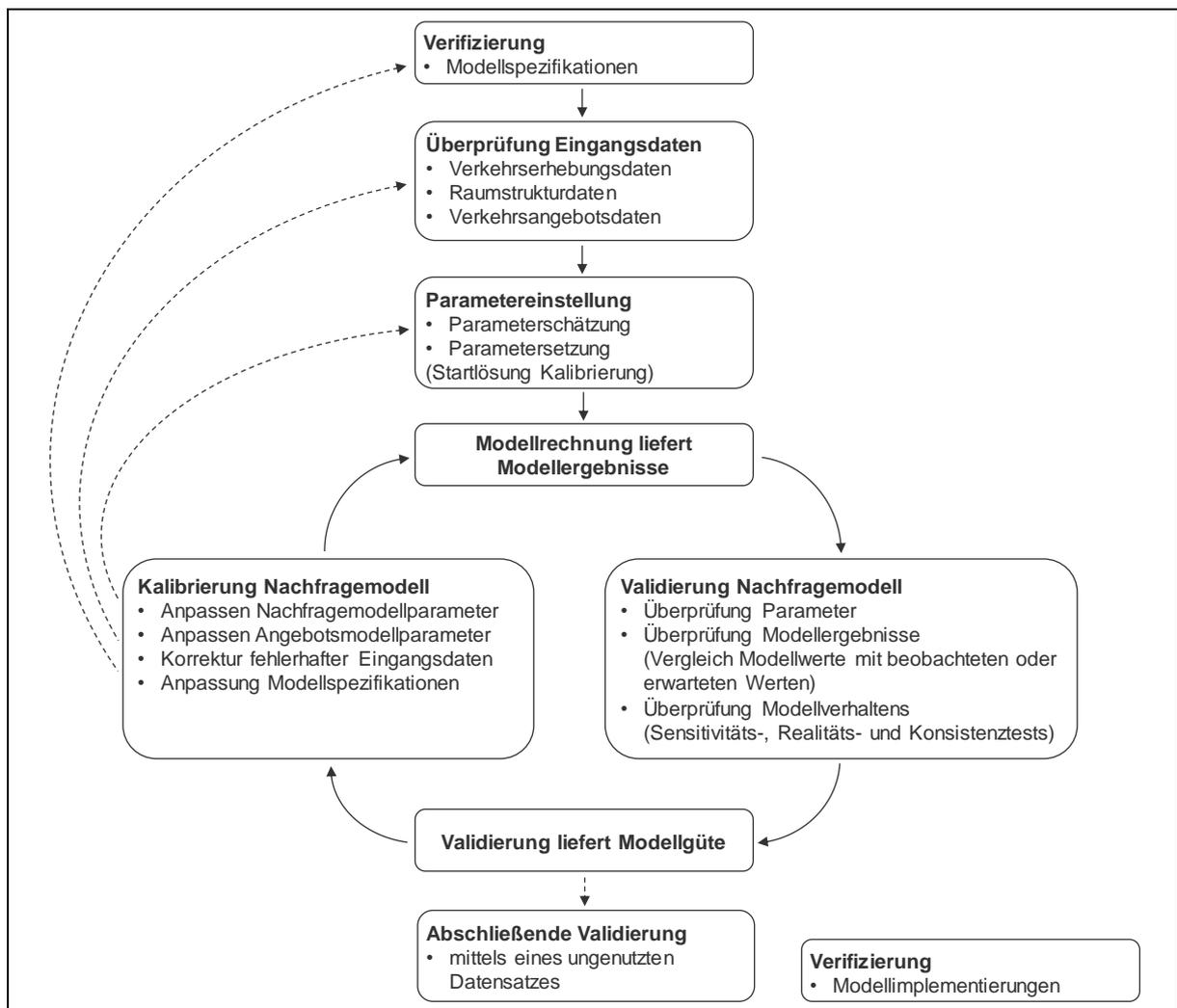


Abbildung 8-1: Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells (Bildquelle: in Anlehnung an Pestel et al. [97]).

## 8.2 Grundlegende Anforderungen an Verkehrsnachmodelle

### 8.2.1 Wirklichkeitstreue

Ein Verkehrsnachfragemodell kann dann als wirklichkeitstreu bezeichnet werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Die vom Modell genutzten Eingangsdaten stimmen mit beobachteten oder erwarteten Werten möglichst gut überein. Das erfordert eine Überprüfung der **Modelleingangsdaten**.
2. Die mit dem Modell ermittelten Werte stimmen mit beobachteten oder erwarteten Werten möglichst gut überein. Das erfordert eine Überprüfung der **Modellergebnisse**.
3. Die Wirkungszusammenhänge zwischen Siedlungsstruktur, Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage werden im Modell so nachgebildet, dass die Wirkungen von Entwicklungen und geplanten Maßnahmen mit dem Modell möglichst gut abgeschätzt werden können. Das erfordert eine Überprüfung des **Modellverhaltens**.

Werden bei der Überprüfung der Wirklichkeitstreue unerwartete Ergebnisse oder Zusammenhänge festgestellt, müssen die Ursachen untersucht und erklärt werden. Dann muss entschieden werden, ob das Modell genutzt werden kann oder ob eine Überarbeitung notwendig ist.

### **Überprüfung der Eingangsdaten**

Wesentliche Eingangsdaten sind Verkehrserhebungsdaten, Siedlungsstrukturdaten und Verkehrsangebotsdaten. Diese Daten müssen auf geeignete Weise erfasst und für die Zwecke der Modellierung aufbereitet werden. Hinweise zur Überprüfung der Eingangsdaten finden sich in Kapitel 6 und in Kapitel 8.6.

### **Überprüfung der Modellergebnisse**

Bei der Überprüfung der Modellergebnisse werden die Modellergebnisse mit Kontrolldaten verglichen:

- Personenbezogene Daten zum Mobilitätsverhalten aus Befragungen (Häufigkeiten von Ortsveränderungen, Reiseweiten und Reisezeiten differenziert nach Modus).
- Verkehrsstärken an Zählstellen.
- Fahrtzeiten zwischen ausgewählten Punkten im Netz.
- Konsistenzanforderungen, die sich aus der Logik von Ortsveränderungen ergeben (z.B. die Zahl der produzierten und angezogenen Pkw-Fahrten einer Zelle muss innerhalb eines Tages übereinstimmen).

Die Überprüfung der Modellergebnisse kann nur für Zustände erfolgen, für die Kontrolldaten vorliegen. Das ist in der Regel der Analysefall oder ein in der Vergangenheit liegender Zustand, für den Modellwerte mit einem Backcasting (Rückwärtsprognose) ermittelt werden. Konsistenzanforderungen benötigen keine empirischen Daten und können gleichermaßen für Analyse- und Prognosezustände überprüft werden. Hinweise zur Überprüfung der Modellergebnisse gibt Kapitel 8.7.3.

### **Überprüfung des Modellverhaltens**

Um sicherzustellen, dass ein Modell maßnahmenempfindlich ist und die Wirkungen von Entwicklungen und geplanten Maßnahmen möglichst gut abgeschätzt werden, werden Sensitivitäts-, Realitäts- und Konsistenztests durchgeführt, die in Kapitel 8.7.4 beschrieben sind:

- Sensitivitätstests prüfen den Einfluss der Modellparameter auf das Modellergebnis. Dabei werden die Modellparameter variiert, während Modellvariablen – in der Regel die Modellvariablen des Analysefalls – unverändert bleiben, so dass Ergebnisänderungen auf einzelne Parameter zurückgeführt werden können.
- Realitätstests prüfen die Prognosefähigkeit eines Modells, in dem die Variablen des Analysefalls verändert werden. Dazu werden das Verkehrsangebot oder die Siedlungsstrukturdaten im Analysefall in kontrollierter Weise verändert (z.B. Veränderung der Fahrtzeit, der Preise oder der Einwohnerzahl). Dann wird überprüft, ob die Modellergebnisse in der erwarteten Größenordnung liegen.

- Konsistenztests prüfen Zusammenhänge, die sich aus der Logik von Ortsveränderungen ergeben. So sollte z.B. die Zahl der Ortsveränderungen, die eine Zelle im Laufe eines Tages verlassen, mit der Zahl der ankommenden Ortsveränderungen übereinstimmen.

### **Aussagegenauigkeit eines Modells (siehe Kapitel 8.8)**

Makroskopische Verkehrsnachfragemodelle modellieren das durchschnittliche Verhalten der Bevölkerung nicht für einen konkreten Kalendertag, sondern einen typischen Verkehrstag, den es so in der Realität nicht gibt. Wenn die Personen einer betrachteten Personengruppe an einem Werktag im Mittel 3,5 Wege durchführen, dann wird im makroskopischen Verkehrsnachfragemodell jede Person dieser Gruppe exakt 3,5 Wege erzeugen. In der Realität treten aber innerhalb einer Personengruppe Schwankungen auf. Vergleicht man die Wegeanzahl, die die Personen einer Verkehrszelle in der Realität erzeugen mit den Modellwerten, dann werden sich mehr oder weniger deutliche Abweichungen ergeben. Die relative Abweichung nimmt dabei mit abnehmender Personenzahl zu. Je kleiner die betrachtete Personenzahl oder Verkehrsstärke, desto größer ist der zu erwartende relative Fehler. Auch wenn eine feinere, disaggregierte Modellierung (Zahl der Personengruppen, Zellengröße, Abbildung von Knotenwiderständen, Abbildung von Aktivitätenketten) die Aussagegenauigkeit erhöht, sind abgesicherte Aussagen trotzdem nur auf einer aggregierten Ebene möglich. Die Aussagegenauigkeit steigt dabei mit zunehmender Aggregation. Die Tatsache, dass ein Nachfragemodell Aktivitäten- und Wegeketten nachbildet, darf also nicht zu der Annahme führen, dass das Modell statistisch abgesicherte Aussagen zu den Aktivitätenorten der Personen einer Verkehrszelle machen kann. Nachfragemodelle können nur Folgendes leisten:

- Das Modell zeigt den Mittelwert des beobachteten Verhaltens, die Realität zeigt die Abweichungen vom Mittelwert.
- Der Mittelwert des Modells und der in der Realität beobachtete Mittelwert stimmen für verschiedene Grundgesamtheiten (z.B. alle Personen einer Personengruppe oder alle Personen in einem größeren Gebiet) überein.

### **8.2.2 Transparenz**

Ein Verkehrsnachfragemodell ist dann transparent, wenn die Modellergebnisse von Dritten kontrolliert werden können. Dazu muss das Modell dokumentiert und die Modelldaten gegenüber Dritten offengelegt werden:

- Dokumentation der Modellergebnisse in einem Modellergebnisbericht: Die Modellannahmen, der Modellaufbau und die wesentlichen Modellergebnisse müssen in einem Bericht dokumentiert werden.
- Dokumentation des Modells in einem Modellhandbuch: Die technische Umsetzung des Modells, die verwendeten Berechnungsalgorithmen und die genutzte Software müssen so beschrieben werden, dass Dritte die Modellrechnungen nachvollziehen können. Dazu gehört die Dokumentation der wesentlichen Modellparameter (u.a. Produktionsraten, Parameter der Nutzenfunktion, Kapazitäten). Dritte müssen die Modellrechnungen wiederholen und analysieren können, wenn das Modell und die Modellierungssoftware zur Verfügung gestellt werden.

- Dokumentation der Modellvalidierung in einem Modellvalidierungsbericht: Die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Modellvalidierung müssen so beschrieben werden, dass die Validierung von Dritten nachvollzogen werden kann. Der Modellvalidierungsbericht soll Aussagen zur Modellgenauigkeit enthalten.
- Offenlegung der Eingangsdaten: Wesentliche Eingangsdaten müssen in überprüfbarer Form zur Verfügung gestellt werden. Dabei müssen Einschränkungen, die sich aus Gründen des Datenschutzes oder der Nutzung lizenzierter Daten ergeben, beachtet werden.
- Offenlegung der Ergebnisdaten: Wesentliche Modellergebnisse müssen in überprüfbarer Form zur Verfügung gestellt werden. Dazu gehören mindestens Reisezeiten und Verkehrsmengen pro Modus zwischen Verkehrszellen und Verkehrsstärken je Netzelement. Im besten Fall wird das komplette Modell zur Verfügung gestellt.

Der Modellauftraggeber sollte bei der Vergabe des Modells sicherstellen, dass der Modellersteller nach der Fertigstellung des Modells die Nutzungsrechte für das Modell an den Modellauftraggeber überträgt. Der Modellauftraggeber bestimmt dann welche Personenkreise Zugang zu den Modelldaten erhalten. Für öffentliche Auftraggeber gelten dabei die Vorgaben des Informationsfreiheitsgesetzes.

### 8.2.3 Operabilität

Ein Modell ist operabel, wenn es nach der Validierung für den vorhergesehenen Einsatzbereich genutzt werden kann und die Entwicklungen und Maßnahmen, die mit dem Modell berechnet werden sollen, mit vertretbarem Aufwand untersucht werden können. Dazu sind folgende Aspekte von Bedeutung:

- Abbildung von Entwicklungen und Maßnahmen: Die zu untersuchenden Entwicklungen und Maßnahmen sollen auf einfache und nachvollziehbare Weise im Modell hinterlegt werden können. Hierfür ist ein rechnergestütztes Szenariomanagement sinnvoll, das Modifikationen der Eingangsdaten dokumentiert und nicht dokumentierte Modelländerungen vermeidet.
- Ergebnisdarstellung: Wichtige Ergebnisse sollen automatisiert ausgewertet und für jedes Szenario in einer einheitlichen Form dokumentiert werden. Das sollte bereits bei der Modellerstellung berücksichtigt werden.
- Rechenzeit: Aus Sicht des Modellanwenders sind kurze Rechenzeiten wünschenswert. Hier muss in Abstimmung mit dem Modellersteller und den Anforderungen des Modellnutzers an die Modellergebnisse ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und Festlegungen zur Erzielung einer angemessenen Modellgenauigkeit (u.a. Zellenanzahl, Konvergenz) gefunden werden.
- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse: Zwei Modellläufe sollten ein identisches Ergebnis liefern. Diese Anforderung erscheint trivial, allerdings kann in der Praxis z.B. die Nutzung unterschiedlicher Betriebssystemversionen oder Rechnerarchitekturen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.
- Nutzerfreundlichkeit: Bei der Auswahl der Modellierungssoftware ist auf die Nutzerfreundlichkeit bei der Eingabe der Daten, bei den Modellrechnungen und bei der Analyse der Ergebnisse zu achten. Das gilt besonders für Modellimplementierungen, bei denen mehrere Softwareprodukte verknüpft werden oder bei denen Computer-Skripte zum Einsatz kommen. Das Modell ist so zu implementieren, dass für eine Modellrechnung keine manuellen Eingriffe erforderlich sind.

- Modellaktualisierung: Das Modell sollte so konzipiert werden, dass es mit begrenztem Aufwand, möglichst bearbeiterunabhängig, kontinuierlich oder periodisch aktualisiert und auf aktuelle Änderungen der Rahmenbedingungen angepasst werden kann.

### 8.3 Ursachen für Abweichungen zwischen Modell und Erhebung

In Verkehrsnachfragemodellen können Abweichungen zwischen Modellwerten und Erhebungswerten nach Pestel et al. [97] durch verschiedene Fehler verursacht werden:

- Abstraktionsfehler: Ein Nachfragemodell abstrahiert die reale Welt. Beispiele für diese Abstraktion sind Verkehrszellen, Anbindungsknoten oder die Abgrenzung des Modellraums. Diese Abstraktionen führen u.a. dazu, dass der Zellbinnenverkehr keinen Beitrag zu Verkehrsstärken liefert, dass Straßen im Bereich von Anbindungen unrealistische Verkehrsstärken aufweisen können, dass Reisezeiten zwischen nahegelegenen Verkehrszellen von den Anbindungspunkten beeinflusst werden und dass Teile der Nachfrage nicht modelliert, sondern aus anderen Datenquellen ergänzt werden. Diese Fehler sind eine Eigenschaft des Modells. Sie können bei der Modellbildung durch eine geeignete Segmentierung von Angebot und Nachfrage reduziert werden. Der Einfluss dieser Fehlerklasse ist schwer quantifizierbar.
- Implementierungsfehler und Spezifikationsfehler: Dieser Fehler tritt auf, wenn sich die Modellspezifikation nicht an den Modellanforderungen orientiert oder wenn der Modellersteller die Modellspezifikation fehlerhaft umsetzt. Fehler dieser Fehlerklasse können durch eine Verifikation bzw. durch ein Review der Modellspezifikation und der Modellimplementierung reduziert werden.
- Messfehler bei Mobilitäts- und Verkehrsdaten: Jede Messung kann Fehler aufweisen. Das betrifft die Erfassung der Wege (Werden alle Aktivitäten berichtet?) mit den zugehörigen Reiseweiten (ohne / mit Geocodierung) und die Messung verkehrlicher Kenngrößen (z.B. Verkehrsstärke, Fahrtzeit). Messmethoden (webbasierte, persönliche oder schriftliche Befragung, ohne / mit GPS, manuelle / automatisierte Zählung), Messgeräte und Auswertemethoden beeinflussen die resultierenden Erhebungswerte. Fehler dieser Fehlerklasse können durch bessere Erhebungsmethoden teilweise reduziert werden.
- Messfehler bei den Siedlungsstrukturdaten: Ein Verkehrsnachfragemodell für den Personenverkehr bildet den Zusammenhang zwischen der Nachfrage von Einwohnern nach Aktivitäten und dem Verkehrsangebot ab. Als Ergebnis liefert es Ortsveränderungen und damit Verkehrsstärken. Die Verkehrsstärken hängen damit unmittelbar von den Siedlungsstrukturdaten ab, die aber immer unbekannte Ungenauigkeiten aufweisen werden. Bei den Einwohnerzahlen können amtliche Statistiken Fehler aufgrund von Zweitwohnsitzen und Wochenendpendlern enthalten. Bei den Aktivitätenorten können viele Größen, wie Arbeitsplätze oder Orte für Freizeitaktivitäten nur abgeschätzt werden. Um Fehler dieser Fehlerklasse zu reduzieren, kann die amtliche Statistik um Daten aus anderen Quellen oder Erhebungen ergänzt werden.
- Stichprobenfehler: Die meisten Erhebungswerte beziehen sich nicht auf eine Erfassung der Grundgesamtheit (z.B. alle Einwohner eines Modellraums), sondern auf eine Zufallsstichprobe. Diese Zufallsstichprobe weist Abweichungen gegenüber dem wahren, unbekanntem Wert der

Grundgesamtheit auf. Das Konfidenzintervall einer Messgröße definiert einen Bereich, in dem der wahre Wert für ein vorgegebenes Konfidenzniveau (z.B. 95%) liegt. Die relativen Abweichungen eines gemessenen Mittelwerts vom wahren, unbekanntem Mittelwert sind bei kleinen Stichproben größer als bei großen Stichproben. Stichprobenfehler können durch höhere Stichproben reduziert werden und sind mit Methoden der Statistik quantifizierbar.

- **Dynamikfehler:** Auch bei einer 100% Stichprobe schwanken die beobachteten Werte von Tag zu Tag, z.B. aufgrund saisonaler Verhaltensmuster. Dynamikfehler können ebenfalls mit Methoden der Statistik quantifiziert werden.
- **Bezugszeitpunktfehler:** Es ist darauf zu achten, dass die Modelleingangsdaten (Verkehrserhebungsdaten, Siedlungsstrukturdaten, Verkehrsangebotsdaten) zusammenpassen. Das setzt voraus, dass die Daten möglichst aus dem gleichen Jahr stammen und dass die Rahmenbedingungen (z.B. temporäre Wirkungen von Baustellen, Eröffnung neuer Verkehrserzeuger oder Verkehrsanlagen im Bezugsjahr) einheitlich sind. Bezugszeitpunktfehler können durch eine Überprüfung der Eingangsdaten offengelegt werden.

Ein Verkehrsnachfragemodell besteht aus mehreren Teilmodellen. Jedes Teilmodell wird Abweichungen zwischen Modellwerten und Erhebungswerten aufweisen. Die relativen Abweichungen eines Teilmodells hängen von der Aggregationsebene ab, die für die Validierung herangezogen wird. Bei einer hohen Aggregation können geringere relative Abweichungen erwartet werden als bei einer niedrigen Aggregation. Die Zahl der Alternativen bestimmt den Detaillierungsgrad des Teilmodells und damit mögliche Aggregationsebenen. Die Zahl der Alternativen im gesamten Modell steigt multiplikativ mit jedem Teilmodell (Wegezwecke  $\times$  Zielzellen  $\times$  Modi  $\times$  Routen). Mit der Zahl der Alternativen reduziert sich die Zahl der Ortsveränderungen pro Alternative, so dass größere relative Abweichungen zu erwarten sind. Da die Teilmodelle aufeinander aufbauen, werden die Modellabweichungen in die nächste Modellstufe übernommen (Fehlerfortpflanzung). Dabei können sich Abweichungen reduzieren oder vergrößern (siehe z.B. Zhao & Kockelman [138] oder de Jong et al. [29]). Tabelle 8-1 zeigt für vier Teilmodelle Beispiele für Kenngrößen mit einer hohen und niedrigen Aggregation. Üblicherweise werden bei einer Modellvalidierung Kenngrößen mit einer hohen Aggregation verwendet.

Teilmodell	Anzahl Alternativen	Kenngrößen mit einer hohen Aggregation der Nachfrage	Kenngrößen mit einer niedrigen Aggregation der Nachfrage
Verkehrserzeugung	Zahl der Wegezwecke	<ul style="list-style-type: none"> <li>• produzierte und angezogene Wege je Wegezweck</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• produzierte und angezogene Wege je Wegezweck und Verkehrszelle</li> </ul>
Zielwahl	Zahl der Verkehrszellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mittlere Reisedistanz und Reisezeit je Wegezweck</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahl der Ortsveränderungen je Wegezweck zwischen zwei Zellen</li> </ul>
Moduswahl	Zahl der Modi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modal-Split je Wegezweck</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahl der Ortsveränderungen je Wegezweck und Modus zwischen zwei Zellen</li> </ul>
Umlegung	Zahl der Routen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personenkilometer und Fahrzeugkilometer je Modus im gesamten Netz oder auf Verkehrswegeklassen</li> <li>• Verkehrsstärke je Modus auf einem Netzelement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahl der Ortsveränderung je Modus und Route</li> </ul>

Tabelle 8-1: Beispiele für Kenngrößen mit einer hohen und niedrigen Aggregation der Nachfrage nach Friedrich et al. [68]

Aus den genannten Ursachen lassen sich für die Quantifizierung der Modellgüte eines Verkehrsnachfragemodells folgende Aussagen ableiten:

- Ursache für Abweichungen zwischen Modellwerten und Erhebungswerten können Abstraktionsfehler, Implementierungsfehler, Stichprobenfehler und Dynamikfehler sein.
- Die relativen Abweichungen zwischen Modellwerten und Erhebungswerten sollten bei Werten, die sich aus vielen Ortsveränderungen ergeben, geringer sein als bei Werten, die nur aus wenigen Ortsveränderungen resultieren. Eine hohe Verkehrsstärke muss eine geringere relative Abweichung als eine niedrige Verkehrsstärke aufweisen. Der Modal-Split-Anteil für den Modus Rad darf größere relative Abweichungen aufweisen als der Modal-Split für den Modus Pkw. Die mittlere Reisezeit der Personen einer Personengruppe oder eines Teilraumes kann größere Abweichungen ergeben als die mittlere Reisezeit über alle Einwohner des Modellraums.
- Vergleiche, die nur auf einer kleinen Zahl von Ortsveränderungen beruhen, sollten nicht zur Überprüfung der Modellgüte herangezogen werden.
- Abweichungen, die ein definiertes Gütemaß überschreiten, müssen interpretiert und erklärt werden.

#### **8.4 Gütemaße für die Überprüfung der Modellergebnisse**

Damit der Nachweis der Validität eines Modells erbracht werden kann, müssen die Abweichungen zwischen Modellwerten  $m$  (model) und Messwerten  $c$  (count) durch geeignete statistische Gütemaße quantifiziert und bewertet werden. Der Vergleich von Modell- und Messwerten kann sich auf Einzelwerte, Mengen von Einzelwerten, Verteilungen und Matrizen beziehen. Zusätzlich können Modellergebnisse visuell geprüft werden. In der Literatur existieren diverse Gütemaße zur Quantifizierung von Abweichungen (siehe Tabelle 8-2). Im Folgenden werden ausgewählte Gütemaße empfohlen. Eine Übersicht mit Erläuterungen zu den in Tabelle 8-2 erwähnten Gütemaßen findet sich in Anlage 1.

Im Rahmen dieses Projektes wurde zudem ein Microsoft Excel-Tool für die Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen erstellt (siehe Anlage 5).

Beurteilung der Übereinstimmung von ...	Gütemaß	Beschreibung in ...
Einzelwerten	Gütemaß $GEH$	Kapitel 8.4.1 und Anlage 1.1
	Gütemaß $SQV$ (Scalable Quality Value)	Kapitel 8.4.1 und Anlage 1.2
	Bewertung von Fahrtzeiten im Netz	Kapitel 8.4.1
	Ja / Nein-Tests	Kapitel 8.4.1
Mengen von Einzelwerten	Korrelationskoeffizient $R$ / Bestimmtheitsmaß $R^2$	Kapitel 8.4.2 und Anlage 1.3
	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers $RMSE$	Kapitel 8.4.2 und Anlage 1.4
	Häufigkeitsverteilungen von Einzelwerten	Kapitel 8.4.2
	Erklärungsqualitätsindikator $EQI$	Anlage 1.4
	Konfidenzintervalle $AKI$	Anlage 1.6
	Orientation Ratio $OR$	Anlage 1.7
Verteilungen	Lageparameter: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mittelwert <math>\bar{x}</math></li> <li>• Standardabweichung <math>s_m</math></li> <li>• Variationskoeffizient der Verteilung <math>V_m</math></li> <li>• Schiefe der Verteilung <math>Sch_m</math></li> </ul>	Kapitel 8.4.3 und Anlage 1.8
	Coincidence Ratio $CR$	Kapitel 8.4.3
	Korrelationskoeffizient $R$ / Bestimmtheitsmaß $R^2$	Kapitel 8.4.2 und Anlage 1.3
	Euklidische Distanz $d$	Anlage 1.9
	Ungleichheitskoeffizienten nach Theil $U$	Anlage 1.10
	Abstandsmaß nach Vortisch $\Delta$	Anlage 1.11
	Statistische Tests	Anlage 1.12
Matrizen	Mittlere, relative Abweichung $r$ zwischen zwei Matrizen	Kapitel 8.4.4
	$SQV$ -Wert aus normierten Matrixsummen	Kapitel 8.4.4
	Mittlerer, gewichteter $SQV$ -Wert über alle Matrixelemente	Kapitel 8.4.4
Visuellen Ergebnissen	Verkehrsstärkekarten und Verkehrsstärkedifferenzkarten	Kapitel 8.4.5
	Spinnenauswertungen	Kapitel 8.4.5
	Auswertung ausgewählter Routenfahrtzeiten	Kapitel 8.4.5
	Chord-Diagramm-Auswertungen	Kapitel 8.4.5
	Heatmap-Auswertungen	Kapitel 8.4.5
	Quell- / Zielverkehrsauswertungen	Anlage 1.13

Tabelle 8-2: Übersicht über Gütemaße für die Überprüfung der Modellergebnisse.

### 8.4.1 Einzelwerte

Bei der Überprüfung von Einzelwerten wird ein einzelner Modellwert  $m$  mit einem Erhebungswert  $c$  verglichen. Für jedes Wertepaar wird eine Aussage über die Güte der Übereinstimmung gemacht. Beispiele für Einzelwerte sind Verkehrsstärken an einer Zählstelle, Fahrtzeiten auf einer Route oder mittlere Reisezeiten für einen Wegezweck. Um die Übereinstimmung zu quantifizieren, kann die absolute oder die relative Abweichung des betrachteten Wertepaares herangezogen werden. Es ist leicht zu erkennen, dass alleine mit der absoluten oder mit der relativen Abweichung keine angemessene Bewertung möglich ist. Bei hohen Verkehrsstärken (z.B. 10.000 Fzg / d) sind – wie oben erläutert – höhere Anforderungen an die relative Abweichung zu stellen, als bei geringen Verkehrsstärken (z.B. 1.000 Fzg / d). Für die absolute Abweichung ist es umgekehrt. Hier sind bei hohen

Verkehrsstärken größere Differenzen akzeptabel als bei geringen Verkehrsstärken. Deshalb sind Gütemaße wünschenswert, die sowohl die relative als auch die absolute Abweichung berücksichtigen.

### Gütemaß *GEH*

Ein verbreitetes Gütemaß, das diese Anforderungen für die Bewertung der Verkehrsstärke erfüllt, ist der sog. *GEH*-Wert, mit folgender Berechnungsvorschrift (vgl. z.B. in WebTAG [33]):

$$g_{GEH} = \sqrt{\frac{2 \cdot (m - c)^2}{m + c}}$$

mit

$g_{GEH}$	Gütemaß <i>GEH</i>
$m$	Verkehrsstärke des Modells
$c$	Verkehrsstärke der Erhebung

Dieser Wert ist nach Geoffrey E. Havers benannt, der ihn für die Zwecke der Verkehrsplanung einführte. Der *GEH*-Wert wird u.a. in den englischen Richtlinien (WebTAG (Unit 3.1) [33]) als Gütemaß herangezogen<sup>23</sup>. Hier wird für stündliche Verkehrsstärken ein *GEH*-Sollwert von 5 gefordert. Die nachstehende Abbildung 8-2 (oben) zeigt für drei Sollwerte des *GEH* (5, 10, 15) den Verlauf der unteren und oberen Modellwerte  $m$ , die sich bei einer gemessenen Verkehrsstärke  $c$  ergeben. Der *GEH* erfüllt die planerische Vorstellung, dass bei höheren Erhebungswerten geringere relative Abweichungen eingehalten werden sollen (siehe Abbildung 8-2 (unten)). Bezogen auf einen Sollwert des *GEH* von 5 ist bei einer Verkehrsstärke von  $c = 1.000$  Fahrzeugen für die nach unten abweichenden Modellwerte  $m$  eine relative Abweichung von 16% zulässig. Die zulässige relative Abweichung reduziert sich bei einer Verkehrsstärke von  $c = 10.000$  Fahrzeugen auf 5%.

<sup>23</sup> In Deutschland wird der *GEH*-Wert ebenfalls verwendet. Er wird z.B. in den Technischen Vertragsbedingungen (TVB) für Verkehrsuntersuchungen [22] gefordert.

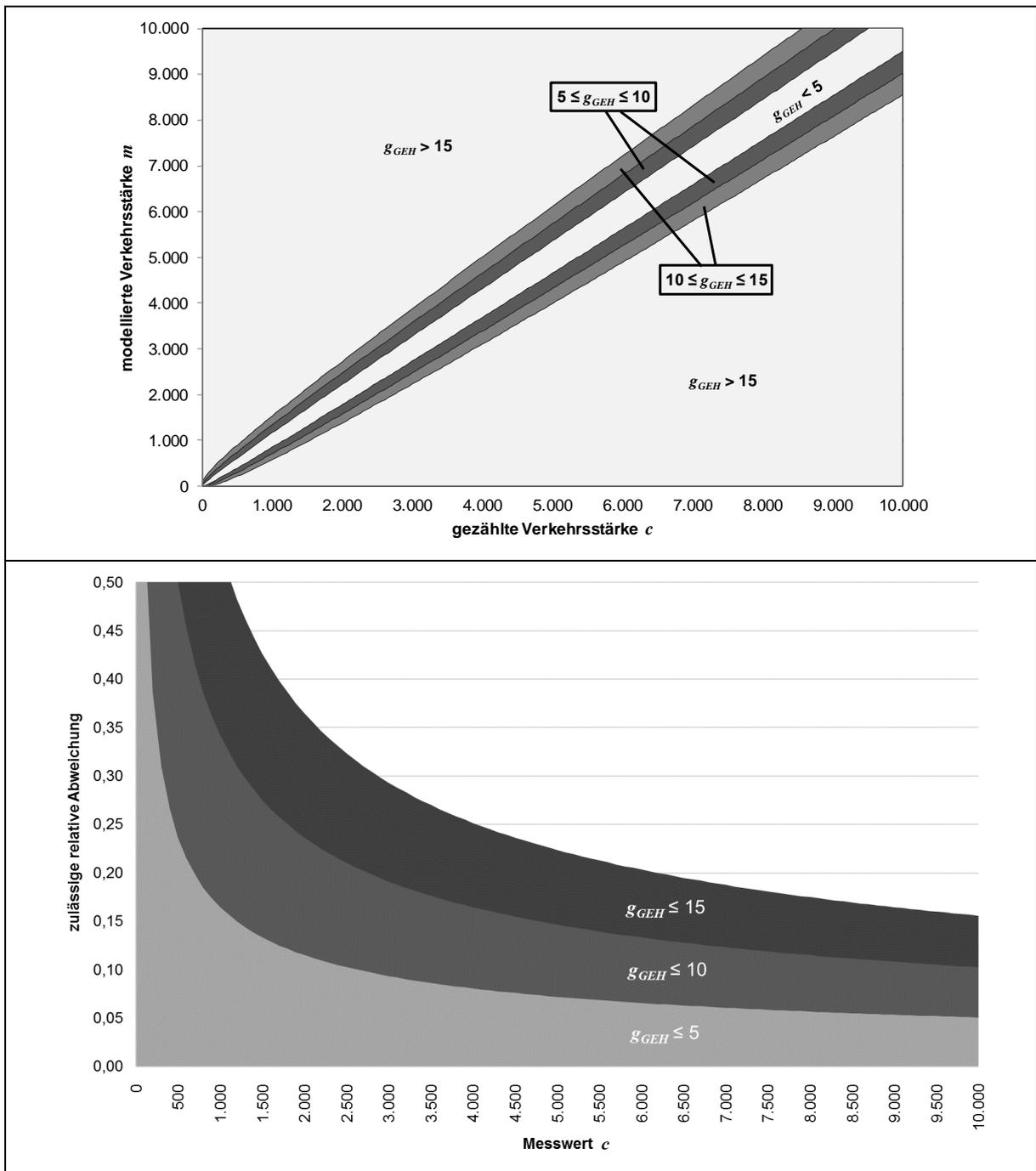


Abbildung 8-2: oben: Verlauf der unteren und oberen Grenzen für die berechneten Werte  $m$  für einen  $GEH$ -Wert von 5, 10 und 15 (Bildquelle: Friedrich & Ritz [67]).  
 unten: Verlauf der zulässigen relativen Abweichung für einen  $GEH$ -Wert von 5, 10 und 15 (Bildquelle: Friedrich et al. [65]).

## Gütemaß $SQV$

Obwohl sich der  $GEH$ -Wert in der Praxis durchgesetzt hat, weist er einige problematische Eigenschaften auf (Friedrich et al. [65]):

- Der  $GEH$  ist nicht selbstskalierend, d.h. die Sollwerte müssen abhängig vom Wertebereich der zu beurteilenden Größe angepasst werden. Damit beispielsweise die Zählwerte einer Stundenzählung und einer Tageszählung an einer Zählstelle vergleichbare Ergebnisse ergeben, muss der Sollwert für die Tageszählung erhöht werden. Deshalb ist der  $GEH$  auch nicht für die Bewertung anderer Kenngrößen, z.B. von Wegelängen, geeignet.  
Darüber hinaus wurden in der Literatur keine speziellen Gütemaße oder spezifischen Vorgaben für die zulässigen Abweichungen von Kenngrößen des Mobilitätsverhaltens gefunden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Funktionsform des  $GEH$ -Wertes, d.h. eine fallende zulässige relative Abweichung bei steigendem Erhebungswert  $c$ , grundsätzlich geeignet ist.
- Der  $GEH$  ist nicht achsensymmetrisch zum Messwert, d.h. eine gleiche absolute Abweichung eines Messwertes nach oben und unten wird unterschiedlich bewertet.
- Der  $GEH$  hat die Einheit  $\sqrt{\text{Verkehrsstärke}}$ . Wünschenswert ist ein einheitenloses Gütemaß.
- Der  $GEH$  liegt nicht in einem Wertebereich zwischen 0 (keine Übereinstimmung) und 1 (perfekte Übereinstimmung).

Um diese problematischen Eigenschaften zu beheben, wurde der  $GEH$ -Wert von Friedrich et al. [65] zu einem  $SQV$ -Wert (Scalable Quality Value) weiterentwickelt<sup>24</sup>. Das Gütemaß  $g_{SQV}$  besitzt folgende Funktionsform:

$$g_{SQV} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(m-c)^2}{f \cdot c}}}$$

mit

$g_{SQV}$	Gütemaß $SQV$
$m$	Wert des Modells
$c$	Wert der Erhebung
$f$	Skalierungsfaktor

Durch die Einführung eines Skalierungsfaktors  $f$  lassen sich mit dem  $SQV$ -Wert auch andere Mobilitätskenngrößen bewerten. Der Skalierungsfaktor  $f$  orientiert sich an der typischen Größenordnung

<sup>24</sup> Abgesehen von einigen Forschungsprojekten ist der  $SQV$ -Wert in der Praxis kaum erprobt. Deshalb sollen Erfahrungen mit diesem Gütemaß in zukünftigen Modellen an das Bundesministerium für Verkehr oder die für die Nachfragemodellierung zuständigen Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen berichtet werden.

der Mobilitätskenngröße<sup>25</sup>. Der Sonderfall  $f=c$  führt dazu, dass der *SQV*-Wert den Kehrwert der relativen Abweichung zwischen  $m$  und  $c$  ausdrückt.

Tabelle 8-3 stellt typische Größenordnungen für verschiedene Mobilitätskenngrößen dar.

Kenngröße	Größenordnung	Skalierungsfaktor $f$
Zahl der Personenwege pro Tag (gesamt, pro Modus, pro Zweck)	$10^0$	1
mittlere Wegelänge in Kilometer	$10^1$	10
Zeitdauer aller Wege pro Person und Tag in Minuten	$10^2$	100
Verkehrsstärke pro Stunde	$10^3$	1.000
Verkehrsstärke pro Tag	$10^4$	10.000

Tabelle 8-3: Skalierungsfaktor  $f$  für verschiedene Kenngrößen.

Allgemein eignet sich der *SQV*-Wert zur Beurteilung von:

- Verkehrsstärken:  
Ggf. kann neben der Tageszeit (siehe Tabelle 8-3) auch nach Verkehrsarten differenziert werden.  
Für eine Beurteilung der Lkw-Verkehrsstärken könnte dann ein Skalierungsfaktor  $f_{Lkw} = 0,1 \cdot f_{Kfz}$  gewählt werden. Allerdings weisen Güterverkehrszählungen – bedingt durch logistische Planungsprozesse – in der Regel größere Varianzen auf. Aus diesem Grund ist eine gute Übereinstimmung zwischen Erhebungs- und Modellwert hier generell schwieriger zu erreichen.
- Personenbezogene Mobilitätskenngrößen:
  - Anzahl der Wege pro Person (nicht differenziert bzw. differenziert nach Modus und / oder Wegezweck, Vorschlag:  $f = 1$ ),
  - mittlere Reisezeiten pro Weg in Minuten (nicht differenziert bzw. differenziert nach Modus und / oder Wegezweck, Vorschlag:  $f = 30$ ),
  - mittlere Reiseweiten pro Weg in Kilometern (nicht differenziert bzw. differenziert nach Modus und / oder Wegezweck, Vorschlag:  $f = 10$ ).

Für folgende Kenngrößen sollte der *SQV*-Wert jedoch nicht verwendet werden:

- Prozentuale Anteile des Modal-Split bzw. Modal-Shares:  
Hier gibt es eine feste Obergrenze von 100%, die nicht überschritten werden kann. Stattdessen kann die Anzahl der Wege pro Person und Modus für die Validierung mit dem *SQV*-Wert verwendet werden.
- Reisezeiten für Wege zwischen 2 Punkten im Netz:  
Diese Kenngröße ist nicht vom Weg einer Einzelperson abhängig, sondern sie repräsentiert eine Folge von Strecken entlang einer Route. Ein Gütemaß hierfür wird im Anschluss an den *SQV*-Wert präsentiert.

<sup>25</sup> Das bedeutet auch, dass bei einer anderen Einheit eine Umrechnung des Skalierungsfaktors stattfinden muss. Werden z.B. Zeitangaben in Stunden statt in Minuten bewertet, muss der Skalierungsfaktor für Stunden  $1/60$  des Skalierungsfaktors für Minuten sein.

Um aggregierte Kenngrößen der Verkehrsnachfrage (Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung, Verkehrszeitaufwand) eines Untersuchungsraums oder Teilraums mit dem  $SQV$  zu validieren, müssen die Kenngrößen auf eine geeignete Bezugsgröße normiert werden. Hierfür eignet sich die Einwohnerzahl des betrachteten Raums. Wird die aggregierte Kenngröße durch die Einwohnerzahl dividiert, ergibt sich eine personenbezogene Mobilitätskenngröße. Tabelle 8-4 zeigt das Vorgehen an einem Beispiel.

Kenngröße	Aggregierter Wert im Untersuchungsraum	Anzahl Einwohner im Untersuchungsraum	Personenbezogener Wert im Untersuchungsraum
Pkw-Wege pro Tag	850.000 Wege / Tag	500.000	1,7 Wege / (Einwohner, Tag)
Verkehrsleistung pro Tag mit einem ÖV-Verkehrsmittel bzw. einem ÖV-Betriebszweig	2.500.000 Pkm / Tag	500.000	5,0 Pkm / (Einwohner, Tag)
Zeit für Wege zu Fuß pro Tag	8.500.000 Minuten / Tag	500.000	17,0 Minuten / (Einwohner, Tag)

Tabelle 8-4: Beispiele für die Umrechnung von aggregierten Kenngrößen im Untersuchungsraum in personenbezogene Kenngrößen. Die Werte beziehen sich immer nur auf Wege mit Quelle und Ziel im Untersuchungsraums.

Analog zum  $GEH$ -Wert werden in Tabelle 8-5 Gütebereiche für den  $SQV$ -Wert festgelegt. Im Fall einer Nichteinhaltung der Gütebereiche sollte der Modellersteller die Ursachen erläutern. Modellersteller und Auftraggeber müssen dann das weitere Vorgehen abstimmen.

$g_{SQV}$	$g_{GEH}$ (bei $f = 1.000$ und $c = 1.000$ ) <sup>26</sup>	Beurteilung	Anwendung in Validierung
0,90	3,4 bis 3,6	Sehr große Übereinstimmung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindeststandard bei Verkehrsstärken mit Matrixkorrektur, der für 85% der Zählstellen eingehalten werden muss.<sup>27</sup></li> <li>• Mindeststandard bei Mobilitätskenngrößen (Anzahl Wege pro Person, mittlere Reiseweiten und Reisezeiten).</li> </ul>
0,85	5,4 bis 5,8	Große Übereinstimmung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orientierungswert für Verkehrsstärken an Netzelementen, für die eine verkehrstechnische Bemessung durchgeführt werden soll.</li> <li>• Mindeststandard für Verkehrsstärken ohne Matrixkorrektur an Screenlines,</li> </ul>
0,80	7,5 bis 8,5	Mittlere Übereinstimmung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindeststandard bei Verkehrsstärken ohne Matrixkorrektur, der für 85% der Zählstellen eingehalten werden muss.<sup>27</sup></li> </ul>
0,75	9,8 bis 11,6	Akzeptable Übereinstimmung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindeststandard, der von jedem Wertepaar erreicht werden muss.</li> <li>• Orientierungswert für die Übereinstimmung von unkorrigierter und korrigierter Matrix bei einer Matrixkorrektur (gilt für die <math>SQV</math>-basierten Gütemaße <math>SQV</math> aus normierten Matrixsummen und mittlerer, gewichteter <math>SQV</math> über alle Matrixelemente, siehe Kapitel 8.4.4).</li> </ul>
< 0,75	> 9,8 bis 11,6	Unzureichende Übereinstimmung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modellergebnis muss begründet werden und Auftraggeber muss der Abweichung zustimmen.</li> </ul>

Tabelle 8-5: Vorschlag für Qualitätsbereiche des Gütemaßes  $g_{SQV}$ . Zum Vergleich sind die entsprechenden Werte des Gütemaßes  $g_{GEH}$  für stündliche Verkehrsstärken ( $f = 1.000$  und  $c = 1.000$ ) dargestellt. Bei der Ermittlung des Gütemaßes  $g_{SQV}$  ist der

<sup>26</sup> Da der  $GEH$ -Wert nicht achsensymmetrisch ist, werden die gleiche absolute Abweichung eines Messwertes nach oben und unten unterschiedlich bewertet.

<sup>27</sup> Wie in Kapitel 8.4.2 bzw. in Abbildung 8-6 erläutert wird, sollte der  $SQV$ -Wert bei dieser aggregierten Auswertung mit der entsprechenden Streckenlänge gewichtet werden.

Stichprobenumfang und die Streuung der Erhebungswerte zu berücksichtigen (siehe Anlage 2.4).

Für Mobilitätskenngrößen gelten nach Tabelle 8-5 höhere Genauigkeitsanforderungen. Dies wird damit begründet, dass Abweichungen bei aggregierten Mobilitätskenngrößen hauptsächlich aus Stichprobenfehlern resultieren, während Modellierungsfehler, d.h. der Abstraktions-, Implementierungs- und Dynamikfehler, nur einen geringen Einfluss haben. Bei disaggregierten Kenngrößen wie Verkehrsstärken hat der Modellierungsfehler einen größeren Einfluss. Daher sind die Genauigkeitsanforderungen hier nicht so hoch wie bei Mobilitätskenngrößen.

Abbildung 8-3 zeigt die maximal zulässige relative Abweichung vom Erhebungswert  $c$  für die vier Gütebereiche des  $SQV$ -Werts. Die x-Achse ändert sich hierbei in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors  $f$ .

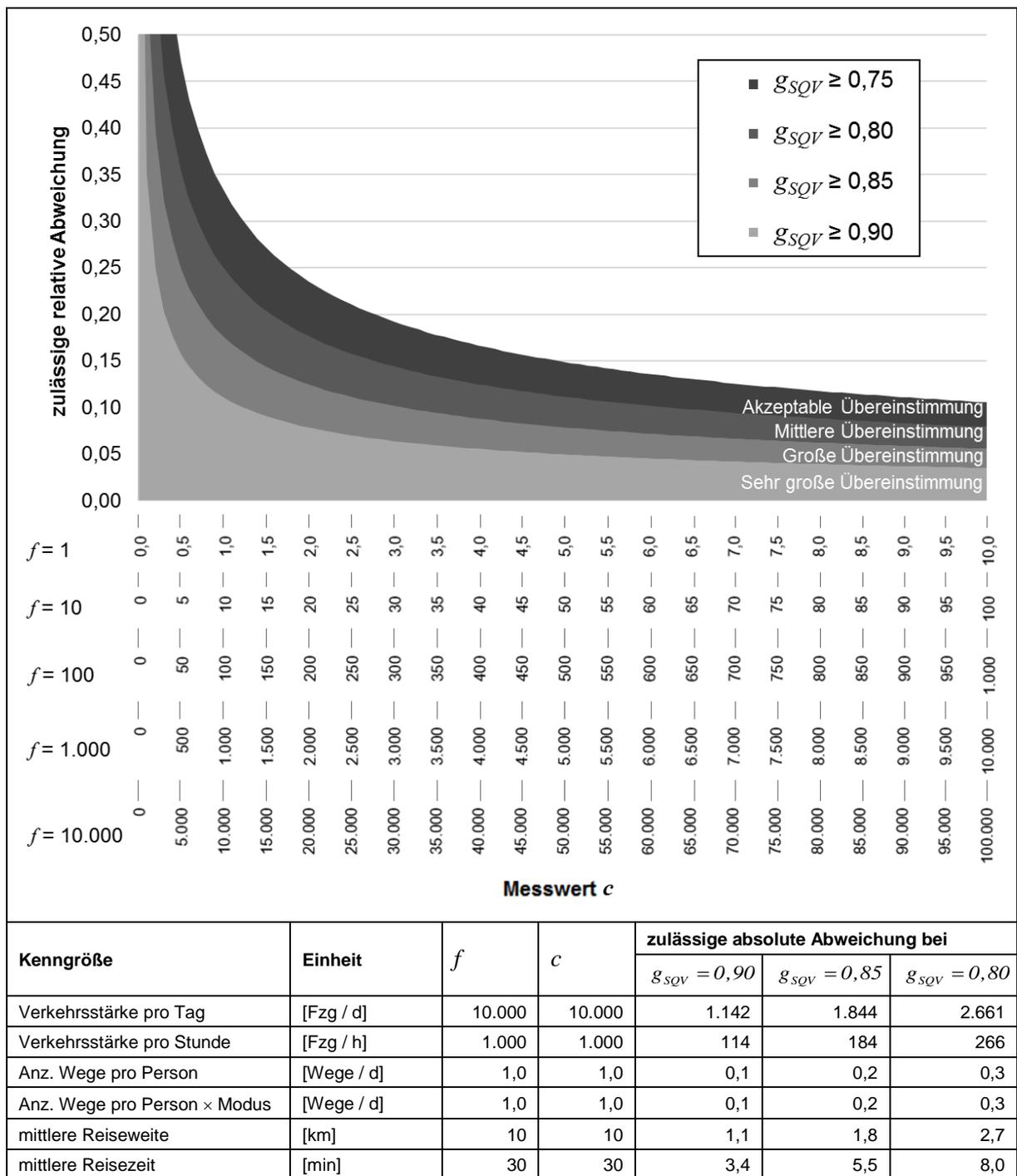


Abbildung 8-3: Beurteilung verschiedener Kenngrößen mit dem SQV-Wert.

Die Erhebung der Mobilitätskenngrößen oder der Verkehrsstärken erfolgt häufig unter nicht-idealen Bedingungen, z.B. großen Standardabweichungen oder kleinen Stichprobengrößen. Für diese Fälle wurde von Friedrich et al. [65] ein Verfahren beschrieben, das diese beiden Fälle in die Berechnung des SQV-Werts integriert. Dieses Verfahren ist in Anlage 2.4 beschrieben.

### Gütekriterium für die Fahrtzeit zwischen zwei Punkten im Netz

Für eine Fahrtzeit zwischen zwei Punkten ist eine beständig steigende absolute Abweichung ein Hinweis auf einen systematischen Modellfehler, z.B. eine zu hohe Geschwindigkeit. Während für kurze Distanzen eine Zunahme der absoluten Abweichung noch mit zufälligen Abweichungen zwischen

Modell und Realität erklärt werden kann, sollte ab einer gewissen Distanz eine Obergrenze der zulässigen absoluten Abweichung nicht mehr überschritten werden. Abbildung 8-4 enthält einen Vorschlag<sup>28</sup> für die Überprüfung beobachteter und modellierter Fahrtzeiten. Dafür sind folgende Gütekriterien einzuhalten:

- Mindestens 50% der untersuchten Relationen sollen folgende Abweichungen zwischen beobachteter und modellierter Fahrtzeit einhalten:
  - Abweichung zwischen 2 bis 5 min im Distanzbereich bis 20 km.
  - Abweichung um maximal 5 min im Distanzbereich über 20 km.
- Mindestens 90% der untersuchten Relationen sollen folgende Abweichungen zwischen beobachteter und modellierter Fahrtzeit einhalten:
  - Abweichung zwischen 5 bis 10 min im Distanzbereich bis 20 km.
  - Abweichung um maximal 10 min im Distanzbereich über 20 km.

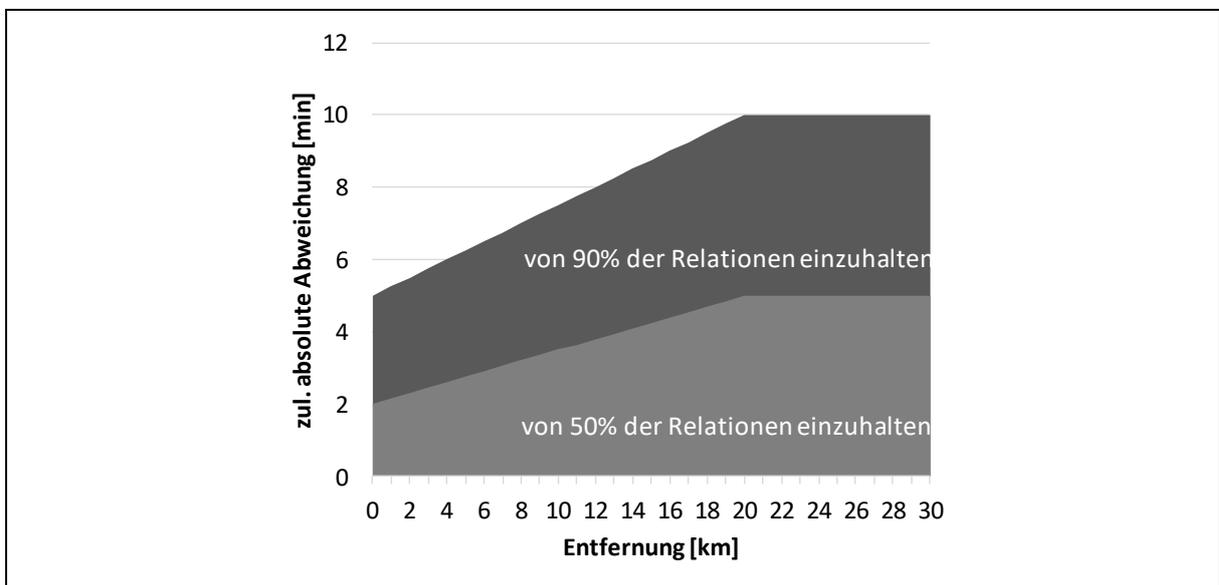


Abbildung 8-4: Bewertung der Abweichung für Einzelwerte von Fahrtzeiten (Bildquelle: Friedrich et al. [68]).

Für diesen Test sollten 20 bis 50 Relationen oder charakteristische Streckenzüge ausgewählt werden. Die Fahrtzeiten der Hauptverkehrszeit und die Fahrtzeiten des (annähernd) leeren Netzes sollten für Pkw- und ÖV-Fahrtzeiten untersucht werden. Als Vergleichsdaten können z.B. Floating Car Data (FCD) (für Pkw, siehe Kapitel 6.4.2) oder Fahrplandaten (für ÖV, siehe Kapitel 6.1.2) herangezogen werden.

### Ja / Nein-Tests

In die Klasse der Einzelwerte fallen auch Aussagen, für die mit einem Ja / Nein-Test überprüft wird, ob eine Anforderung erfüllt wird:

<sup>28</sup> Abgesehen von einigen Forschungsprojekten ist dieses Kriterium in der Praxis kaum erprobt. Deshalb sollen Erfahrungen mit diesem Gütemaß in zukünftigen Modellen an das Bundesministerium für Verkehr oder die für die Nachfragemodellierung zuständigen Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen berichtet werden.

- Liegt ein Wert im erwarteten Wertebereich?
- Erfüllt das Modell eine geforderte Konvergenzbedingung?
- Erfüllt das Modell eine geforderte Konsistenzbedingung?

#### 8.4.2 Mengen von Einzelwerten

Der Vergleich von Mengen von Einzelwerten vergleicht eine Menge von modellierten und erhobenen Wertepaaren und führt zu Aussagen über die Güte dieser Menge. Die betrachteten Wertepaare sollten dabei (weitgehend) unabhängig voneinander sein. Beispiele für Wertemengen sind Verkehrsstärken an mehreren Zählstellen oder Fahrtzeiten über mehrere Relationen. Um statistische Gütemaße für Mengen von Einzelwerten anhand vorgegebener Sollwerte bewerten zu können, müssen die Einzelwerte in Werteklassen gruppiert werden. Sammer et al. [109] geben einige Hinweise für die Klassenskalierung:

- Es sollen mindestens 3 (besser 5) Klassen vorhanden sein.
- Jeder Klasse sollen mindestens 10 Elemente (z.B. Messquerschnitte) zugeordnet werden können, um einen Mindeststichprobenumfang sicherzustellen und dadurch eine Normalverteilung annehmen zu können. Befinden sich weniger als 10 Elemente in einer Klasse, so ist diese mit den benachbarten Klassen zusammenzufassen.
- Das arithmetische Mittel der Elemente einer Klasse sollte ungefähr der Klassenmitte entsprechen.
- Um mehrere Planfälle und Modelle besser vergleichen zu können, schlagen Sammer et al. [109] eine einheitliche Klasseneinteilung für Verkehrsstärken vor, die in Abbildung 8-5 dargestellt ist (schwarz dargestellte Klassen). Das bereits beschriebene Problem der „Selbstskalierung“ bleibt bei diesem Vorgehen allerdings bestehen.

Um die Übereinstimmung der modellierten und erhobenen Wertemengen – insbesondere Verkehrsstärken – zu bewerten, werden häufig die nachstehend erläuterten Gütemaße herangezogen. Für diese Gütemaße gilt, dass sie nur die Menge der Werte beurteilen. Fehlerhafte Einzelwerte können dabei übersehen werden, obwohl sie z.B. aufgrund ihrer Lage von großer Bedeutung sind. Aus Sicht der Autoren sollten diese Gütemaße deshalb nur ergänzend zu den Gütemaßen für die Einzelwerte herangezogen werden.

#### Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmaß

Der Korrelationskoeffizient  $R$  und das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  stellen Qualitätsmaße dar, die die Abhängigkeit von zwei Datensätzen überprüfen.  $R$  ist eine dimensionslose Größe zwischen -1,0 und 1,0. Sie spiegelt das Ausmaß der linearen Abhängigkeit zwischen zwei Datensets wieder. Das Bestimmtheitsmaß drückt aus, wie hoch der Anteil der Variation ist, der von den unabhängigen Variablen des Modells erklärt wird. Dabei gilt, dass mit einem größer werdenden Bestimmtheitsmaß der Anteil der Daten höher ist, die durch die Regressionsfunktion erklärt werden. Weiterhin wird  $R^2$  als Verhältnis der Varianz der abhängigen Variable zur Varianz der unabhängigen Variablen interpretiert. Diese Interpretation kann jedoch nur teilweise auf die Validierung einer Verkehrsumlegung übertragen werden, da die Umlegung bedingt durch verschiedene Kalibrierungs- und Validierungsdatensets nicht

vollständig unabhängig von den Verkehrszählungen ist. Weiterhin ist kritisch zu betrachten, dass das Bestimmtheitsmaß einerseits nichts über die Kausalität des betrachteten Zusammenhangs aussagt und andererseits mit zunehmender Anzahl an untersuchten Einflussfaktoren zwangsläufig steigt [5; 26].  $R^2$  ist daher nur mit Einschränkungen als Gütemaß geeignet. In der Literatur genannte Grenzen für akzeptable  $R^2$ -Werte schwanken zwischen 0,88 [26], 0,95 [26] und 0,98 [33].

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N (c_n - \bar{c})(m_n - \bar{m})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (c_n - \bar{c})^2 \cdot \sum_{n=1}^N (m_n - \bar{m})^2}}$$

mit

$N$  Anzahl der Einzelwerte

$c_n$  bzw.  $m_n$   $n$ . Messwert bzw. Modellwert

$\bar{c}$  bzw.  $\bar{m}$  Mittelwert aller Messwerte bzw. Modellwerte

### Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers

Dieses Qualitätsmaß – auch als „Root Mean Squared Error“ ( $RMSE$ ) – bzw. dessen prozentuale Form („Percent Root Mean Squared Error“,  $\%RMSE$ ) werden u.a. im Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [26] vorgeschlagen. Ein häufiger Anwendungsbereich bei der Verkehrsnachfragemodellierung ist der Vergleich von Verkehrsstärken. Voraussetzung ist, dass die Strecken nach Straßenklasse (funktionale Klassierung) oder Verkehrsstärke (qualitative Klassierung) klassiert sind. Zusätzlich ist es möglich, die Strecken gemäß ihrer geographischen Lage zusammenzufassen, was die Validierungsinformation weiter erhöht. Eine allzu sehr aggregierte Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers sagt allerdings wenig aus und lässt somit keine Rückschlüsse auf das Gesamtmodell zu. Neben der Beurteilung der Umlegungsqualität dient die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers auch zur Einschätzung der Modellstufenqualität. [26; 109]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (c_n - m_n)^2}{N}}$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\frac{\sum_{n=1}^N c_n}{N}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (c_n - m_n)^2}{N}}}{\frac{\sum_{n=1}^N c_n}{N}} \cdot 100\%$$

mit

$N$  Anzahl der Einzelwerte

$c_n$  bzw.  $m_n$   $n$ . Messwert bzw. Modellwert

Für den  $\%RMSE$  finden sich in den Regelwerken amerikanischer Bundesstaaten Vorschläge für Richtwerte, die in Abbildung 8-5 dargestellt sind. Dabei ist zu beachten, dass die Klassenbreiten zwischen den einzelnen Richtlinien variieren.

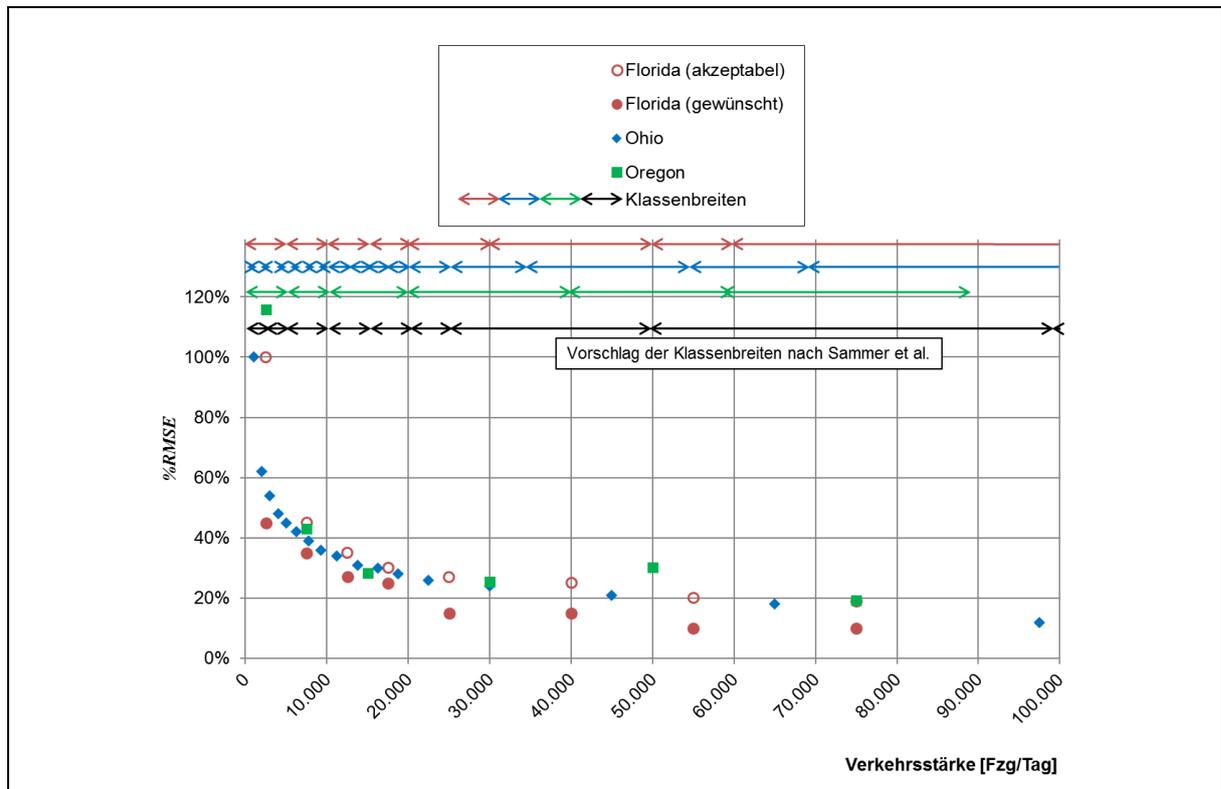


Abbildung 8-5: Zulässige  $\%RMSE$ -Werte in Abhängigkeit von der Verkehrsstärkenklasse [26] und Klasseneinteilung nach Sammer et al. [109] (Bildquelle: Pestel et al. [97]).

### Häufigkeitsverteilungen von Einzelwerten

Für Mengen von Einzelwerten lassen sich neben ihrer Betrachtung als Einzelwerte, Häufigkeitsverteilungen der statistischen Gütemaße für Einzelwerte ausweisen. Sie geben den Anteil der Wertepaare an, deren Gütemaße in bestimmte Gütemaßklassen entfallen (z.B.  $SQV < 0,75$ , von 0,75 bis 0,80, 0,80 bis 0,85, von 0,85 bis 0,90 und  $> 0,9$ ).

Bei diesen aggregierten Auswertungen empfiehlt es sich, nicht die reine Anzahl von Wertepaaren heranzuziehen, sondern die Wertepaare immer mit der zugehörigen Streckenlänge zu gewichten. Damit wird vermieden, dass sich der Anteil einer Klasse nur aufgrund einer trivialen Veränderung im Netzmodell ändert (z.B. Teilung einer Strecke in zwei Teilstrecken, siehe Abbildung 8-6). [68]

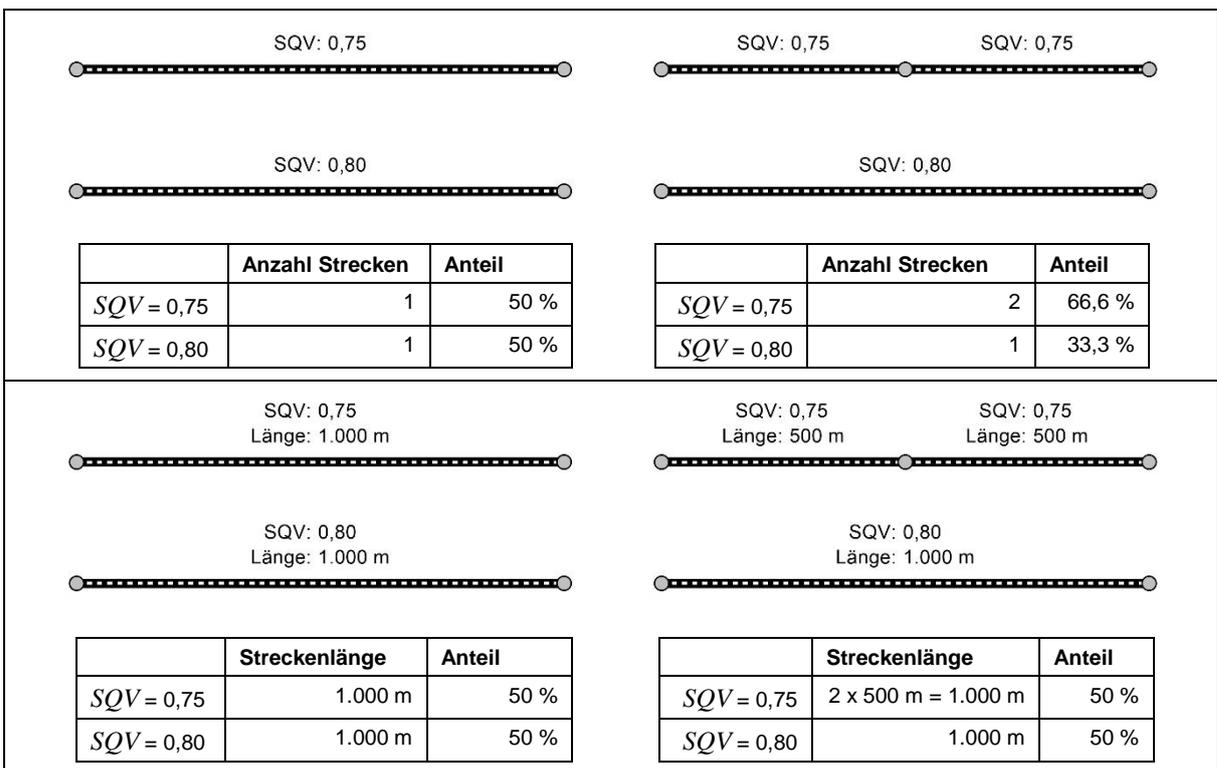


Abbildung 8-6: Beispielhafte  $SQV$ -Auswertung für den Fall, dass eine Strecke halbiert wird: oben bezogen auf die Streckenanzahl, unten bezogen auf die Streckenlänge. Es wird deutlich, dass der Bezug auf die Streckenlänge dazu führt, dass sich die Anteilswerte in der jeweiligen Güteklasse nicht ändern. (Bildquelle: Friedrich et al. [68]).

### 8.4.3 Verteilungen

Zur Prüfung der Übereinstimmung von zwei Verteilungen (z.B. Reiseweiten- oder Reisezeitenverteilungen) können diese in einem gemeinsamen Diagramm abgetragen werden (siehe Abbildung 8-7).

Eine rein optische Prüfung auf Übereinstimmung ist jedoch oft nicht ausreichend. Im Folgenden wird eine Auswahl von Gütemaßen erläutert, anhand derer der Vergleich von zwei Verteilungen  $x$  und  $y$  quantifiziert werden kann.

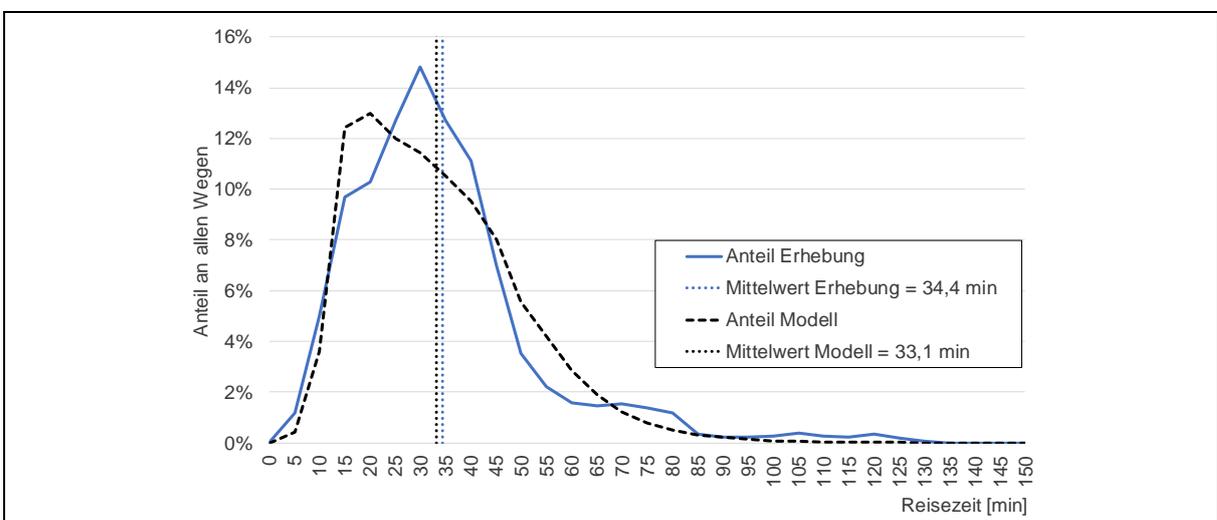


Abbildung 8-7: Vergleich einer gemessenen und einer modellierten Reisezeitverteilung (Bildquelle: Pestel et al. [97]).

Darüber hinaus haben Untersuchungen von Pestel [96] gezeigt, dass das Gütemaß beim Verteilungsvergleich in hohem Maße von der Klassierung der Daten abhängt. Es ist somit unerlässlich, dass eine standardisierte Verteilungsklassierung<sup>29</sup> verwendet wird, um vergleichbare Gütemaße für eine Bewertung zu erhalten. Speziell müssen dabei folgende Punkte beachtet werden, die in Anlage 2.5 detailliert erläutert werden:

- Einheitliche Festlegung der Klassierungskenngröße:  
Es sollte eine modusunabhängige Kenngröße, z.B. der Luftlinienweite oder einer mittleren gewichteten Reisezeit, gewählt werden. In bestimmten Fällen kann auch die Betrachtung der Verkehrsleistung sinnvoll sein.
- Einheitliche Festlegung der Referenzverteilung:  
Je nach Anwendungsfall können Erhebungen / Haushaltsbefragungen (für den Abgleich von Modell und Erhebung) oder Basis-Modellzustände (für die Analyse von Veränderungen, z.B. bei Realitätstests) verwendet werden.
- Einheitliche Festlegung des Untersuchungsraums und der betrachteten Wege:  
Der Vergleich muss sich auf Wege beziehen, die von Einwohnern des Untersuchungsraums getätigt werden und ihre Quelle sowie ihr Ziel im Untersuchungsraum haben.
- Einheitliche Festlegung der Klassierungsmethode (Klassenbreite und Klassenanzahl):  
Es empfiehlt sich die Erzeugung von 10 äquiquantilen (= gleich besetzten) Klassen. Die Klassenbreite ist dabei so zu wählen, dass die Klassen die gleiche Besetzung aufweisen.

### Lageparameter einer Verteilung

Der Vergleich folgender Lageparameter, die Lage, Aussehen und Eigenschaften einer Verteilung beschreiben, ist zu empfehlen. Die dargestellten Berechnungsvorschriften beziehen sich dabei immer auf klassierte Daten.

- Gewichteter Mittelwert der Verteilung (entspricht der mittleren Kenngröße, z.B. der mittleren Reiseweite):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^K x_k \cdot h_k}{N} \quad (\text{gewichteter Mittelwert aus klassierter Verteilung})$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} x_{od} \cdot d_{od}}{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}} \quad (\text{gewichteter Mittelwert aus relationsfeinen Daten})$$

<sup>29</sup> Abgesehen von einigen Forschungsprojekten ist die vorgestellte Klassierungsmethode in der Praxis kaum erprobt. Deshalb sollen Erfahrungen mit diesem Gütemaß in zukünftigen Modellen an das Bundesministerium für Verkehr oder die für die Nachfragemodellierung zuständigen Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen berichtet werden.

- Standardabweichung der Verteilung:

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K h_k \cdot (x_k - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (\text{für eine Stichprobe})$$

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K h_k \cdot (x_k - \bar{x})^2}{N}} \quad (\text{für eine endliche Grundgesamtheit})$$

mit

$h_k$  absolute Häufigkeit  $h$  der Klasse  $k$

$x_k$  Kenngrößen-Klassenmitte  $x$  in der Klasse  $k$

$x_{od}$  Kenngröße zwischen Quelle  $o$  und Ziel  $d$  ( $o, d \in Z$ )

$d_{od}$  Nachfrage zwischen Quelle  $o$  und Ziel  $d$  ( $o, d \in Z$ )

$K$  Klassenanzahl

$N$  Anzahl der Einzelwerte

### Coincidence Ratio

Das Coincidence Ratio ( $CR$ ) untersucht, wie gut sich zwei Verteilungen überdecken (siehe Abbildung 8-8). Eingangsgröße für die Berechnung sind die jeweiligen relativen Einzelhäufigkeiten einer Klasse. Der errechnete  $CR$  hat einen Wertebereich von 0 bis 1, wobei  $CR=1,0$  eine vollkommene Übereinstimmung und  $CR=0$  keinerlei Übereinstimmung anzeigt. Ab einem Wert von  $CR=0,7$  wird laut Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [26] von einer guten Übereinstimmung gesprochen. Hierbei sollte allerdings darauf geachtet werden, dass dieser Auswertung eine ausreichend große Wegemenge zugrunde liegt.<sup>30</sup>

$$g_{CR} = \frac{\sum_{k \in K} \min \{ p_k^m, p_k^c \}}{\sum_{k \in K} \max \{ p_k^m, p_k^c \}}$$

mit

$$p_k^m = \frac{m_k}{\sum_{k \in K} m_k} \quad \text{und} \quad p_k^c = \frac{c_k}{\sum_{k \in K} c_k} \quad \text{sowie:}$$

<sup>30</sup> Abgesehen von einigen Forschungsprojekten ist das Gütemaß Coincidence Ratio in der Praxis kaum erprobt. Deshalb sollen Erfahrungen mit diesem Gütemaß in zukünftigen Modellen an das Bundesministerium für Verkehr oder die für die Nachfragemodellierung zuständigen Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen berichtet werden.

$g_{CR}$	Gütemaß Coincidence Ratio
$K$	Zahl der Klassen in der Häufigkeitsverteilung
$m_k$	Summe der Nachfrage aus dem Modell in der $k$ . Klasse
$c_k$	Summe der Nachfrage aus der Erhebung in der $k$ . Klasse
$p_k^m$	Anteil der Nachfrage aus dem Modell in der $k$ . Klasse
$p_k^c$	Anteil der Nachfrage aus der Erhebung in der $k$ . Klasse

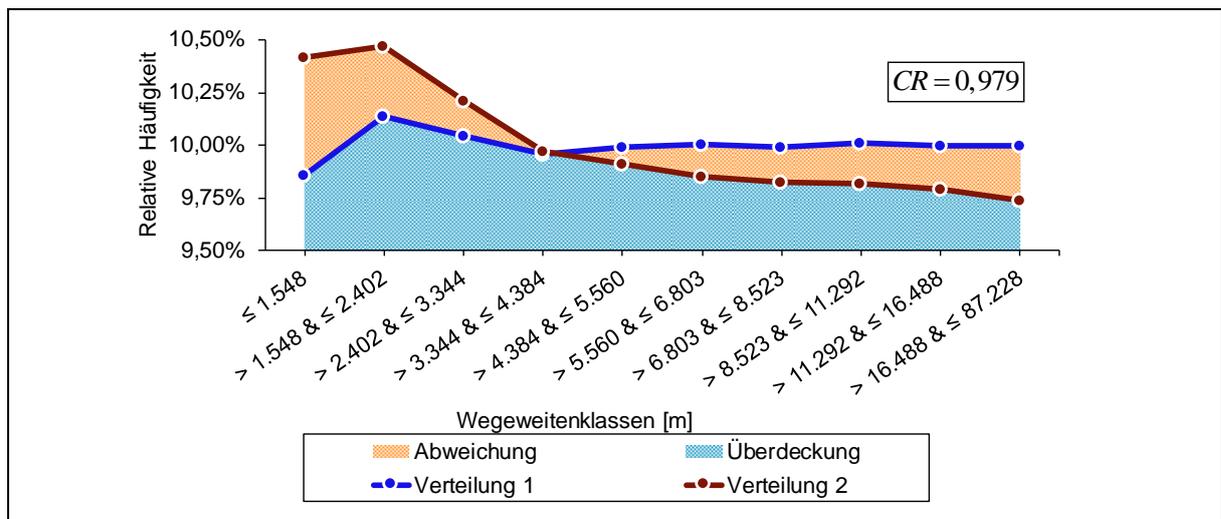


Abbildung 8-8: Quantifizierung der Übereinstimmung von Verteilungen mit dem Coincidence Ratio (Bildquelle: in Anlehnung an Pestel [96]).

#### 8.4.4 Matrizen

Vergleiche von Nachfragematrizen oder von Matrizen der Verkehrsleistung oder des Verkehrszeitaufwandes werden hauptsächlich in zwei Einsatzbereichen benötigt:

- beim Einsatz von Matrixkorrekturen oder
- um den Grad der Übereinstimmungen zwischen einer modellierten und einer empirischen Matrix zu bestimmen.

Für solche Vergleiche gibt es bisher nur wenige Gütemaße. Das verwendete Gütemaß sollte einen gut interpretierbaren Wertebereich aufweisen und sowohl auf relative, absolute und systematische Abweichungen reagieren. Friedrich et al. [68] haben drei solche Gütemaße<sup>31</sup> entwickelt, die im Folgenden vorgestellt werden: die gemittelte relative Abweichung von zwei Matrizen und zwei Abwandlungen des  $SQV$ -Wertes für den Vergleich von Matrizen. Allgemein können alle Gütemaße für

<sup>31</sup> Abgesehen von einigen Forschungsprojekten sind die vorgestellten Kriterien in der Praxis kaum erprobt. Deshalb sollen Erfahrungen mit diesem Gütemaß in zukünftigen Modellen an das Bundesministerium für Verkehr oder die für die Nachfragemodellierung zuständigen Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen berichtet werden.

den kompletten Untersuchungsraum oder nur für spezielle Teilräume (z.B. Landkreise) ausgewiesen werden.

Als Verallgemeinerung in Anlehnung an die Kapitel 2.3.4 und 5.1.10 wird folgende Notation verwendet:

- Element der Referenzmatrix, z.B. empirische Nachfragematrix oder Nachfragematrix vor der Matrixkorrektur:  $d_{od}$ ,
- Element der Vergleichsmatrix, z.B. modellierte Nachfragematrix oder Nachfragematrix nach der Matrixkorrektur:  $d_{od}^K$ .

### Mittlere, relative Abweichung $r$ zwischen zwei Matrizen

Für Matrizen des Verkehrsaufkommens (Nachfragematrizen)	Für Matrizen der Verkehrsleistung oder des Verkehrszeitaufwandes
für alle Korrekturen: $r = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z}  d_{od}^K - d_{od} }{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}}$	für alle Korrekturen: $r = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z}  d_{od}^K - d_{od}  \cdot x_{od}}{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od} \cdot x_{od}}$
nur für positive Korrekturen: $r^+ = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z}  d_{od}^K - d_{od} }{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}} \quad \forall (d_{od}^K - d_{od}) > 0$	nur für positive Korrekturen: $r^+ = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z}  d_{od}^K - d_{od}  \cdot x_{od}}{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od} \cdot x_{od}} \quad \forall (d_{od}^K - d_{od}) > 0$
nur für negative Korrekturen: $r^- = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z}  d_{od}^K - d_{od} }{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}} \quad \forall (d_{od}^K - d_{od}) < 0$	nur für negative Korrekturen: $r^- = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z}  d_{od}^K - d_{od}  \cdot x_{od}}{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od} \cdot x_{od}} \quad \forall (d_{od}^K - d_{od}) < 0$
mit	
$d_{od}^K$	korrigierte/r Nachfrage / Verkehrsleistung / Verkehrszeitaufwand der Relation $o-d$
$d_{od}$	unkorrigierte/r Nachfrage / Verkehrsleistung / Verkehrszeitaufwand der Relation $o-d$
$x_{od}$	Aufwandskenngröße (z.B. Reiseweite oder Reisezeit) der Relation $o-d$
$r$	relative Abweichung durch eine Matrixkorrektur [%]
$r^+$	relative Abweichung durch positive Matrixkorrekturen [%]
$r^-$	relative Abweichung durch negative Matrixkorrekturen [%]

Abbildung 8-9: Berechnung der mittleren, relativen Änderung  $r$  zwischen zwei Matrizen. [68]

Je besser die beiden Matrizen übereinstimmen bzw. je geringer ihre Abweichungen sind, desto kleiner ist die mittlere, relative Abweichung  $r$ .

### SQV-Wert aus normierten Matrixsummen

Dieses Gütemaß bestimmt den SQV-Wert aus den normierten Matrixsummen:

$$c = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}}{\sum_{o \in Z} z_o} = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}}{\sum_{o \in Z} EW_o}$$

$$m = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od} + |d_{od} - d_{od}^K|}{\sum_{o \in Z} z_o} = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od} + |d_{od} - d_{od}^K|}{\sum_{o \in Z} EW_o}$$

$c$  und  $m^{32}$  können hierbei als Wegeanzahl pro Einwohner und Zeiteinheit (z.B. Tag) interpretiert werden. Der  $SQV$ -Wert berechnet sich mit der Formel aus Kapitel 8.4.1. Als Skalierungsfaktor  $f$  sollte ein Wert angenommen werden, der ungefähr der mittleren Wegeanzahl, der mittleren Verkehrsleistung oder dem mittleren Verkehrszeitaufwand pro Einwohner und Zeiteinheit (z.B. Tag) entspricht. Aus diesem Grund wird  $f = c$  empfohlen<sup>33</sup>. Je besser die beiden Matrizen übereinstimmen bzw. je geringer ihre Abweichungen sind, desto mehr nähert sich der  $SQV$ -Wert dem Wert 1 an.

$$g_{SQV} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(m-c)^2}{f \cdot c}}}$$

mit

$d_{od}^K$  korrigierte Nachfrage der Relation  $o-d$

$d_{od}$  unkorrigierte Nachfrage der Relation  $o-d$

$z_o$  bzw.  $EW_o$  Siedlungsstrukturgröße (hier: Einwohnerzahl) in der Verkehrszelle  $o$

$g_{SQV}$  Gütemaß  $SQV$

$m$  Wegeanzahl pro Einwohner und Zeiteinheit der Vergleichsmatrix

$c$  Wegeanzahl pro Einwohner und Zeiteinheit der Referenzmatrix

$f$  Skalierungsfaktor

### Mittlerer, gewichteter $SQV$ -Wert über alle Matrixelemente

Hierbei wird zunächst der  $SQV$ -Wert für jedes Matrixelementepaar mit der Formel aus Kapitel 8.4.1 berechnet. Es ist allerdings zu beachten, dass für dieses Gütemaß relative Häufigkeiten der

<sup>32</sup> Es wird auf eine analoge Berechnung zu  $c$  verzichtet, da sonst im Falle einer Normierung der Matrixsummen bereits ein ideales Ergebnis erreicht wäre, was nicht im Sinne des Gütemaßes ist.

<sup>33</sup> Der Sonderfall  $f = c$  führt dazu, dass der  $SQV$ -Wert den Kehrwert der relativen Abweichung zwischen  $m$  und  $c$  ausdrückt

Nachfragematrizen verwendet werden. Als Skalierungsfaktor  $f$  wird der Kehrwert der quadrierten Zellenanzahl<sup>34</sup> verwendet:  $f = 1/Z^2$ .

Anschließend wird ein gewichteter Mittelwert über die  $SQV$ -Werte gebildet, wobei die relativen Häufigkeiten der Referenzmatrix als Gewicht fungieren.

$$d_{od}^{rel} = \frac{d_{od}}{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}} ; \quad d_{od}^{K,rel} = \frac{d_{od}^K}{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^K}$$

$$g_{SQV,od} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(d_{od}^{K,rel} - d_{od}^{rel})^2}{f \cdot d_{od}^{rel}}}}$$

$$\overline{g_{SQV}} = \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} (g_{SQV,od} \cdot d_{od}^{rel})$$

mit

$d_{od}^K$  korrigierte Nachfrage der Relation  $o-d$

$d_{od}$  unkorrigierte Nachfrage der Relation  $o-d$

$d_{od}^{K,rel}$  relative Häufigkeit des Matrixelements der korrigierten Nachfrage

$d_{od}^{rel}$  relative Häufigkeit des Matrixelements der unkorrigierten Nachfrage

$g_{SQV,od}$  Gütemaß  $SQV$  auf Matrixelementebene

$\overline{g_{SQV}}$  mittlerer, gewichteter  $SQV$ -Wert über alle Matrixelemente

$f$  Skalierungsfaktor

Je besser die beiden Matrizen übereinstimmen bzw. je geringer ihre Abweichungen sind, desto mehr nähert sich der mittlere, gewichtete  $SQV$ -Wert dem Wert 1 an. Bei der Verwendung dieses Wertes muss beachtet werden, dass sich bei der Auswertung von Teilräumen die betrachtete Zellenanzahl und somit der Skalierungsfaktor  $f$  ändert. Für solche Auswertungen muss demzufolge zunächst der Skalierungsfaktor und im Anschluss das Gütemaß neu bestimmt werden.

<sup>34</sup> Dieser Wert ergibt sich wenn man den Skalierungsfaktor als mittlere relative Wegehäufigkeit betrachtet: die Summe aller relativen Wegehäufigkeiten (in Summe = 1) dividiert durch die Anzahl der Matrixrelationen.

### Gegenüberstellung der vorgestellten Gütemaße für einen Matrixvergleich

Die Gütemaße eignen sich für den Vergleich von Matrizen, die keine offensichtliche systematische Abhängigkeit aufweisen. Jedoch haben alle vorgestellten Gütemaße Stärken und Schwächen und eignen sich daher für unterschiedliche Fragestellungen, wie in Tabelle 8-6 beschrieben.

Eignung des Gütemaßes für einen Vergleich von 2 Matrizen ...	Mittlere, relative Abweichung $r$ zwischen zwei Matrizen	$SQV$ -Wert aus normierten Matrixsummen	Mittlerer, gewichteter $SQV$ -Wert über alle Matrixelemente
... ohne systematische Abhängigkeit.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
..., wobei eine Matrix <u>systematisch um eine additive Konstante</u> von der anderen Matrix abweicht (z.B. jeder Matrixwert ist um den Wert 10 erhöht).	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
..., wobei eine Matrix <u>systematisch um einen multiplikativen Faktor</u> von der anderen Matrix abweicht (z.B. jeder Matrixwert ist um das 10-fache erhöht).	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
..., wobei eine Matrix eine Stichprobe (Erhebung) und die andere Matrix eine Vollerhebung (Nachfragemodell) repräsentiert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabelle 8-6: Gegenüberstellung der vorgestellten Gütemaße für einen Matrixvergleich. [68]

Die *mittlere, relative Abweichung  $r$  zwischen zwei Matrizen* eignet sich generell für grobe Matrixvergleiche. Im Gegensatz zu den anderen beiden Gütemaßen ist sein Wertebereich nicht zwischen 0 und 1, sondern theoretisch zwischen 0 und  $\infty$ . Außerdem werden nur die Summen der absoluten Nachfrage<sup>35</sup> betrachtet. Daher ist dieses Gütemaß nicht geeignet, um die Struktur einer Matrix z.B. anhand des Vergleichs einer Stichprobenmatrix mit einer Modellmatrix zu bewerten. Dies gilt auch für den  *$SQV$ -Wert aus normierten Matrixsummen*. Zudem benötigt dieses Gütemaß zwei weitere Eingangsdaten: die Einwohnerzahl im Untersuchungsraum und einen Skalierungsfaktor. Der *mittlere, gewichtete  $SQV$ -Wert über alle Matrixelemente* kann die Matrixstruktur bewerten, da er mit der prozentualen Nachfrage (bezogen auf die Gesamtnachfrage) arbeitet. Diese Eigenschaft führt allerdings dazu, dass ein systematischer multiplikativer Faktor (z.B. alle Matrixelemente multipliziert mit 10) nicht erkannt wird. Das Vergleichsergebnis wäre dann, dass die Matrizen perfekt übereinstimmen.

#### 8.4.5 Grafische Darstellungen

Zur weiteren Unterstützung bei der Auswertung und zur besseren Veranschaulichung der Modellergebnisse bieten sich Visualisierungen an, z.B.:

- Darstellung von Verkehrsstärkekarten und Verkehrsstärkedifferenzkarten (Differenzplot) des Netzmodells (beispielhaft dargestellt für die Wirkungen einer Matrixkorrektur im Verkehrsmodell des Verbands Region Stuttgart in Abbildung 8-10).

<sup>35</sup> Allgemein sollte die Prüfung der absoluten Nachfrage nicht erst an dieser Stelle der Validierung erfolgen, sondern schon bei der Validierung der angezogenen und erzeugten Nachfrage pro Verkehrszelle (Ergebnis der Verkehrserzeugung).

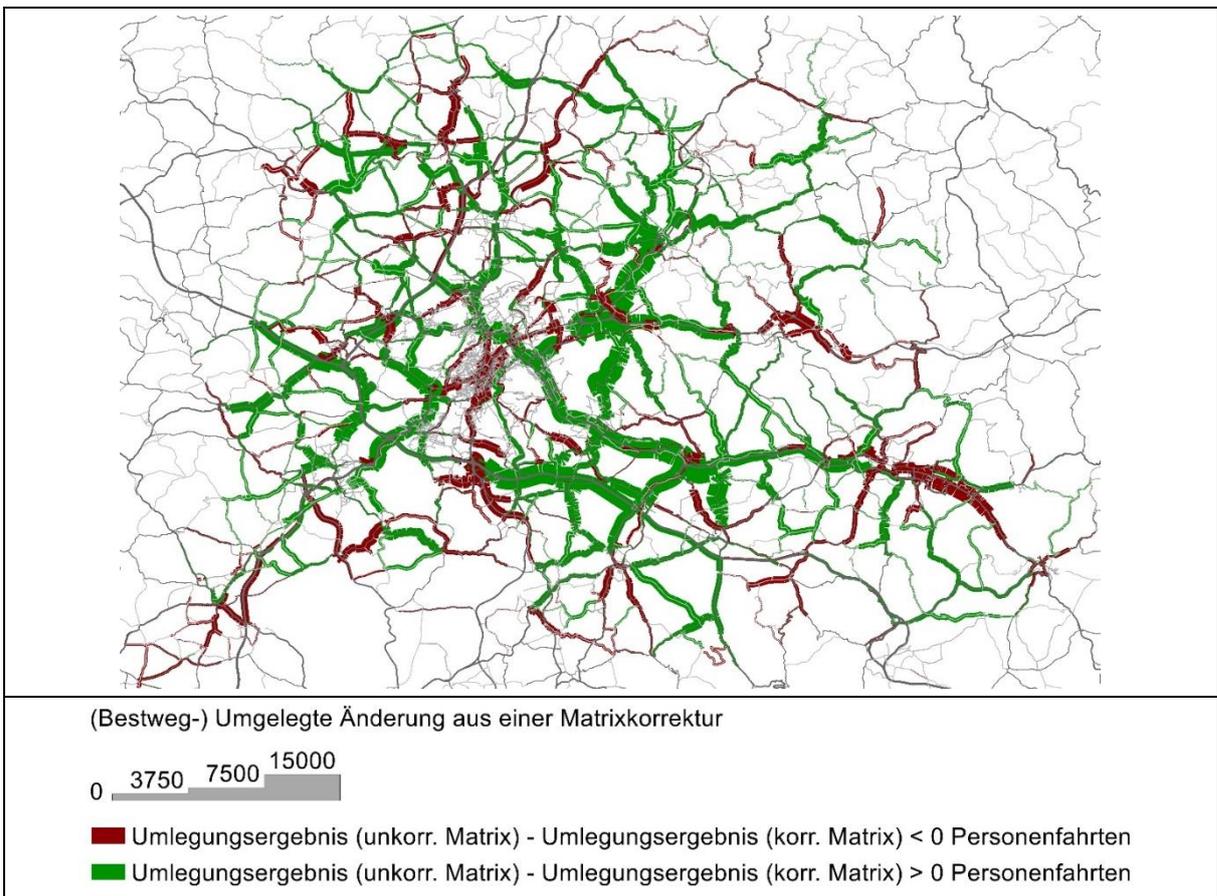


Abbildung 8-10: Beispielhafte Darstellung einer Verkehrsstärkedifferenzkarte für die Beurteilung der Wirkungen der Matrixkorrektur.

- Darstellungen von Spinnenauswertungen an wichtigen Querschnitten oder für Verkehrszellen von zentralen Orten. Sie zeigen die Quellen und / oder Ziele der Verkehrsströme an, die das gewählte Netzelement passieren (beispielhaft dargestellt für einen ausgewählten Stadtbezirk des Verkehrsmodells des Verbands Region Stuttgart in Abbildung 8-11).

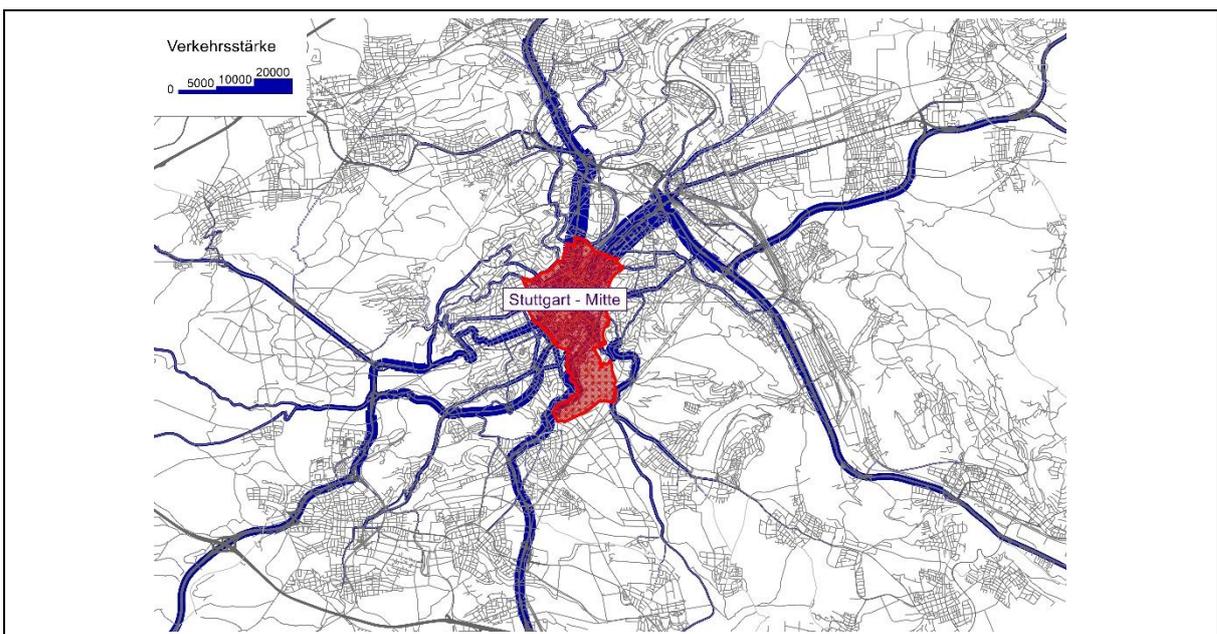


Abbildung 8-11: Beispielhafte Darstellung des Quell- und Zielverkehrs eines Stadtbezirks (Stuttgart-Mitte).

- Darstellungen von erhobenen und modellierten Reisezeiten auf stichprobenartig ausgewählten Routen. Die beobachtete Reisezeit sollte dabei mit einem Konfidenzbereich von 95% angegeben werden.

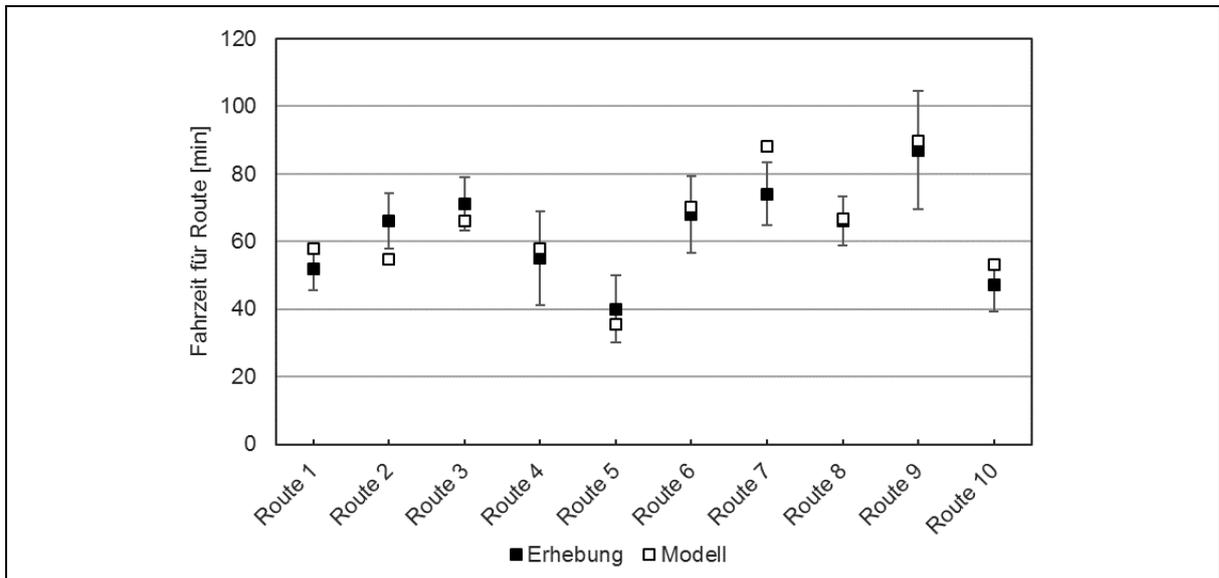


Abbildung 8-12: Beispielhafter Vergleich von erhobenen und modellierten Routenfahrzeiten wobei die erhobenen Fahrzeiten eine gewisse Streuung aufweisen (Bildquelle: modifizierte Darstellung nach [125]).

- Hollander [74] empfiehlt zudem eine eher unkonventionelle Darstellung von Relationen mittels „Chord-Diagramm“. Aufgrund der Übersichtlichkeit erscheint nur eine Darstellung von aggregierten Strömen sinnvoll, z.B. zwischen wichtigen Stadtbezirken (beispielhaft dargestellt für ausgewählte Relationen zwischen Stadtbezirken des Verkehrsmodells des Verbands Region Stuttgart in Abbildung 8-13).

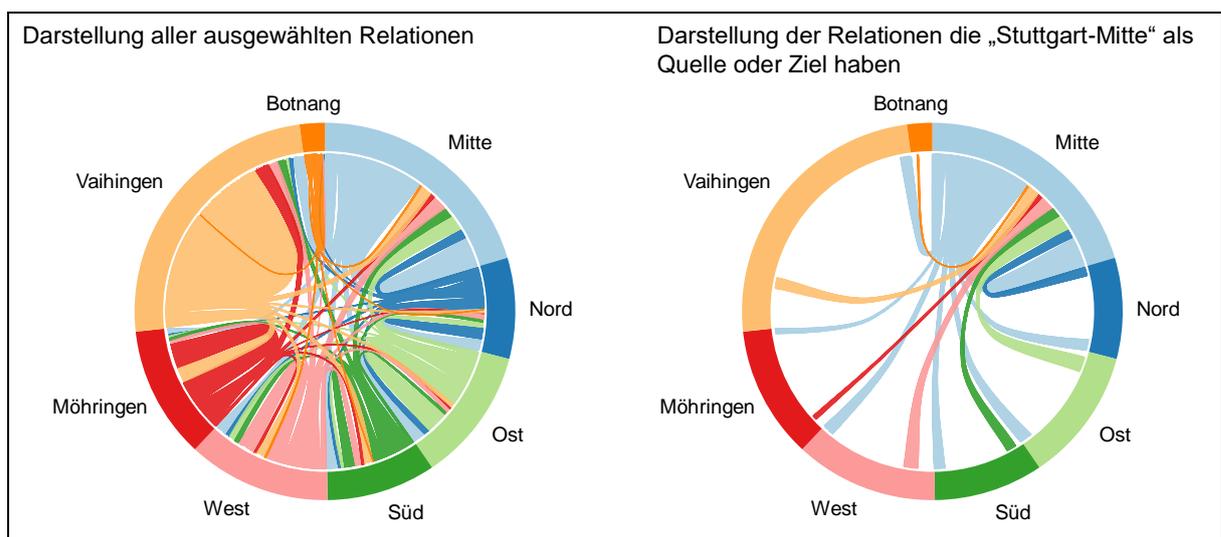


Abbildung 8-13: Beispielhafte Darstellung ausgewählter Relationen zwischen Stuttgarter Stadtbezirken mittels Chord-Diagramm:  
links: alle Relationen,  
rechts: nur die Relationen die „Stuttgarter-Mitte“ als Quell- oder Zielstadtbezirk haben.

- zur Visualisierung von Matrizen bietet es sich an, die einzelnen Relationswerte einzufärben und eine Gesamtansicht der Matrix als sogenannte „Heatmap“ zu zeigen (siehe Abbildung 8-14). Dies ist

jedoch nur sinnvoll, wenn die Verkehrszellennummerierung die räumliche Nähe der Verkehrszellen ungefähr widerspiegelt. Mit dieser Visualisierungsmethode lassen sich z.B. relationsfeine Modal-Split-Werte, Elastizitäten oder Nachfragewerte darstellen.

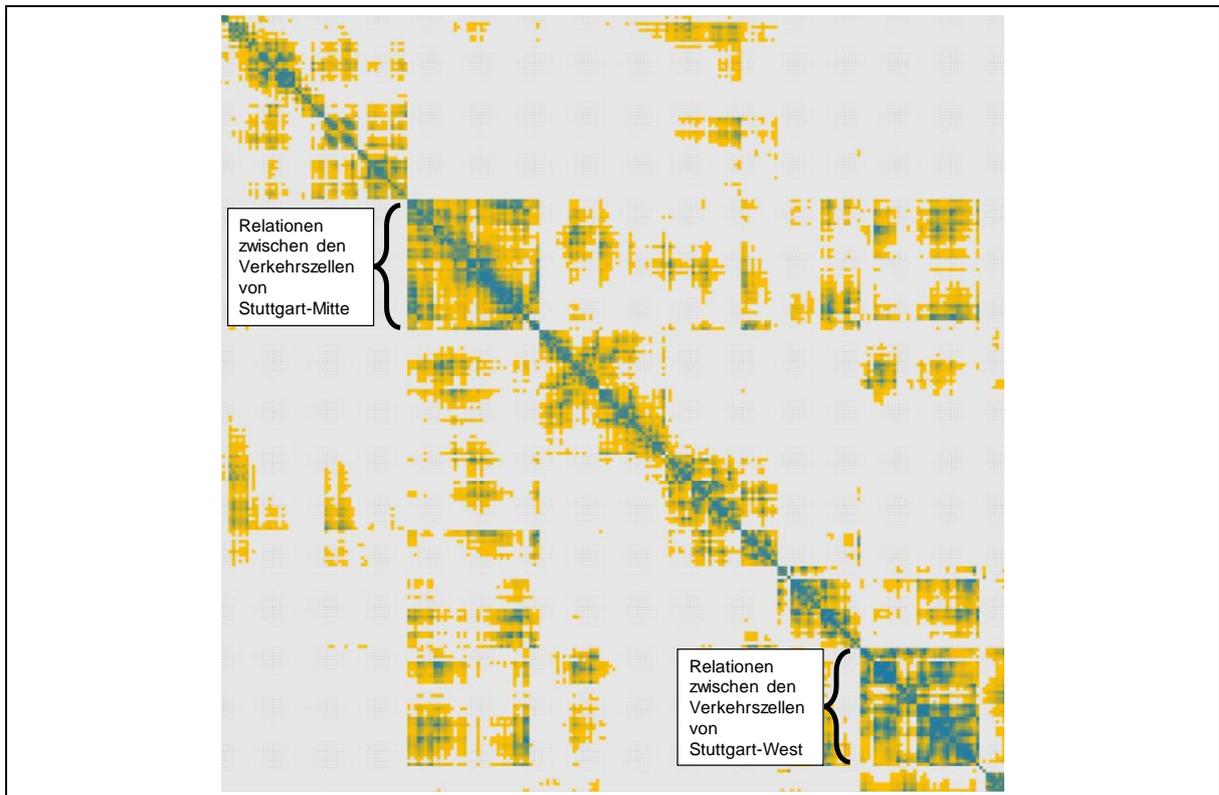


Abbildung 8-14: Visualisierung von Matrizen am Beispiel des Modal-Splits von zu Fuß zurückgelegten Wegen. Durch die Einfärbung werden besondere Relationen sichtbar – in diesem Fall Relationen mit einer hohen Fuß-Nachfrage innerhalb und zwischen den Verkehrszellen von Stuttgart-Mitte und Stuttgart-West.  
(Legende: grau = Anteil < 1%, Farbverlauf von gelb (1%) zu blau (100)).

## 8.5 Verifizierung der Spezifikation und der Implementierung

Bei der **Verifizierung der Modellspezifikationen** prüft eine unabhängige dritte Person, ob die in der Modellspezifikation beschriebene Vorgehensweise angemessen ist, um die Anforderungen der Modellnutzer zu erfüllen.

Die **Verifizierung der Modellimplementierung** prüft inwieweit die in der Modellspezifikation beschriebenen Daten und Methoden tatsächlich umgesetzt wurden. Dazu begibt sich die prüfende Person in die Rolle des Modellanwenders, installiert das Verkehrsnachfragemodell auf einem neuen Rechner und führt eigene, anwendungsorientierte Testrechnungen durch, die sich an den Realitätstests orientieren.

## 8.6 Überprüfung der Eingangsdaten

Die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells wird maßgeblich von der Qualität der Eingangsdaten bestimmt. Wesentliche Eingangsdaten sind Verkehrserhebungsdaten, Siedlungsstrukturdaten und Verkehrsangebotsdaten. Diese Daten sollten beim Aufbau des Verkehrsnachfragemodells und vor der Kalibrierung der Modellparameter auf ihre Qualität hin untersucht werden. Die Eingangsdaten müssen in sich konsistent sein, d.h. die Verkehrsstärkedaten müssen zu den Mobilitätsverhaltensdaten und den Siedlungsstrukturdaten passen. Sie müssen sich deshalb zeitlich auf den gleichen Zustand beziehen (es gibt im Sommer mehr Radverkehr als im Winter, Netzänderungen beeinflussen die Routenwahl) und besondere Rahmenbedingungen (Baustellen zum Erhebungszeitpunkt) müssen berücksichtigt werden.

### 8.6.1 Verkehrserhebungsdaten

Verkehrserhebungsdaten umfassen personenbezogene Daten zum Mobilitätsverhalten aus Befragungen und netzbezogene Daten zu Verkehrsstärken an Zählstellen und Fahrtzeiten zwischen ausgewählten Punkten im Netz. Erhebungsdaten stellen den Bezug zur wirklichen Welt her. Sie sind jedoch immer nur eine Beobachtung der Realität und können aufgrund der Stichprobengröße oder aufgrund von Erhebungsfehlern von der Realität abweichen. Um ausgehend von der Stichprobe repräsentative Schlüsse auf die Grundgesamtheit ziehen zu können, müssen die Mobilitätsverhaltensdaten unbedingt gewichtet vorliegen.

Mobilitätsverhaltensdaten beinhalten u.a. die Kenngrößen Mobilitätsrate, Reiseweite und Reisezeit, differenziert nach Wegezweck und Modus, die auf folgende Weise überprüft werden sollten:

- Einzelwertprüfungen mit erwarteten Werten aus anderen Verkehrsbefragungen (z.B. Mikrozensus) und
- Angabe der Konfidenzintervalle für die Mobilitätskenngrößen bei einem Konfidenzniveau von 95%.

Die Daten sollten für die spätere Validierung so aufbereitet und hochgerechnet werden, dass die Mobilitätskenngrößen für alle Wege und für die Teilmenge der Wege im Untersuchungsraum bekannt sind.

Für jede Zählstelle sollten folgende Informationen benannt werden:

- Erhebungsjahr,
- Zahl der Erhebungstage (Dauerzählstelle, mehrtägige Erhebung, Tageszählung),
- Erhebungszeitraum (ganzer Tag, Teil eines Tages mit Hochrechnung),
- erfasste Fahrzeugklassen (siehe Tabelle 6-2).

Jeder Zählwert sollte mit einem Gütemaß bewertet werden. Dabei gilt, dass Zählraten aus einer Dauerzählstelle eine höhere Aussagekraft als Einmalzählungen haben und dass neuere Daten eine höhere Aussagekraft als ältere Daten haben. Zählraten sollten nicht älter als 3 Jahre sein. Für Dauerzählstellen sollte das Konfidenzintervall der Verkehrsstärke für ein Konfidenzniveau von 95% bestimmt werden.

### 8.6.2 Siedlungsstrukturdaten

Siedlungsstrukturdaten umfassen die Siedlungsflächen, die Einwohnerdaten differenziert nach Altersklassen und die Standortdaten von Aktivitätenorten mit zugehörigen Eigenschaften (Arbeitsstandorte / Arbeitsplätze, Schulstandorte / Schulplätze, Einkaufsstandorte / Größenklasse). Siedlungsstrukturdaten werden auf Verkehrszellen bezogen, die als Quellen und Ziele von Ortsveränderung die Standorte der jeweiligen Siedlungsstruktur, das Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage miteinander verknüpfen. Folgende Kenngrößen der Siedlungsstrukturdaten sollten ausgewiesen und überprüft werden:

- Siedlungsdichte (Einwohner bezogen auf die Siedlungsfläche) auf Verkehrszellenebene,
- Arbeitsplatzdichte (Arbeitsplätze bezogen auf die Siedlungsfläche) auf Verkehrszellenebene,
- Verhältnis der Arbeitsplätze pro Einwohner und der Erwerbstätigen pro Arbeitsplatz auf Gemeindeebene,
- Verhältnis der Schüler pro Schulplätze auf Gemeindeebene und
- Vergleich der aggregierten Siedlungsstrukturdaten (Einwohner, Beschäftigte am Arbeitsplatz) auf Gemeindeebene mit Daten der statistischen Ämter.

Liegen Standortdaten als Einzelpunkte (POI) vor, sollte die Qualität der Daten stichprobenhaft überprüft werden. Außerdem ist eine visuelle Prüfung mit Hilfe von Dichtekarten empfehlenswert.

### 8.6.3 Verkehrsangebotsdaten

Verkehrsangebotsdaten beinhalten sämtliche Daten zur Infrastruktur des Modells (Strecken, Knoten, Haltestellen, etc.) und alle Daten, die für den Betrieb der Infrastruktur notwendig sind (Fahrpläne, Preissysteme, etc.). Verkehrsangebotsdaten lassen sich auf der Ebene der einzelnen Netzelemente und auf der Relationsebene überprüfen.

Auf der Ebene von Netzelementen sollen Netztopologie und Netzattribute überprüft werden:

- Anzahl der Arme pro Knotenpunkt (z.B. maximal 5 Zufahrten pro Knotenpunkt),
- Vergleich der Netzlängen nach Straßenklasse und Vergleich mit Werten aus der amtlichen Statistik,
- Vergleich der mittleren Geschwindigkeit je Straßenklasse und Ortslage mit Erwartungswerten oder Messergebnissen,
- Anzahl der Haltestellen je Verkehrszelle (z.B. maximal ein Schienenhaltepunkt je Zelle) und
- Luftlinienentfernung zwischen einer Haltestelle und ihrem Zugangsknoten.

Sobald das Netzmodell erstellt ist, können Kenngrößenmatrizen berechnet und Testumlegungen durchgeführt werden. Dabei sollten folgende Werte überprüft werden:

- Vergleich der Kenngrößen (Reisezeiten, ggf. Fahrpreise) und der Fahrtrouten für ausgewählte Relationen mit Daten aus unabhängigen Quellen, z.B. einem Routenplanungsprogramm oder Floating Car Data. Dazu kann das in Kapitel 8.4.1 vorgestellte Gütekriterium für die Fahrtzeit zwischen zwei Punkten im Netz verwendet werden.

- Berechnung und Überprüfung relationsbezogener Kenngrößen:
  - Ist das Netz zusammenhängend, d.h. kann für jede Relation die Reisezeit berechnet werden?
  - Luftliniengeschwindigkeit: Werte, die nach den Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN [51]) als sehr gut oder sehr schlecht eingestuft werden, sollten überprüft werden.
  - Umwegfaktor: Werte über 1,5 sollten überprüft werden.
  - Reisezeitverhältnis ÖV / Pkw: dieser Wert sollte üblicherweise zwischen 0,5 (ÖV ist doppelt so schnell wie Pkw) und 5 liegen (ÖV ist 5-mal langsamer als der Pkw).
  - Reisezeitverhältnis Hin- und Gegenrichtung: In der Normalverkehrszeit sollten beide Richtungen ähnliche Werte aufweisen.
  - Anteil der Wartezeiten an Knotenpunkten bezogen auf die gesamte Fahrtzeit.
  - Anteil der Anbindungszeiten (Zu- und Abgang) an der gesamten Reisezeit.
- Die Netzbelastungen sollten bei einer Bestwegumlegung in beiden Richtungen ähnlich sein.
- Die Netzbelastungen in einem unabhängigen Netzmodell (z.B. OpenStreetMap) sollten im Hauptstraßennetz ähnlich sein.

#### 8.6.4 Umgang mit Mängeln bei den Eingangsdaten

Mängel bei den Eingangsdaten können bereits bei der Erstellung einer Spezifikation bekannt sein (z.B. fehlende Verfügbarkeit räumlich differenzierter Strukturdaten) oder während der Eingangsdatenüberprüfung auftreten. Die Mängel werden sich nicht immer beheben lassen. Das kann die Qualität der Modellergebnisse beeinflussen. Die Mängel sollten deshalb dokumentiert werden, um bei der Validierung mögliche Ursachen für Abweichungen benennen zu können. Tabelle 8-7 zeigt eine Auswahl von Mängeln, die das Modellergebnis beeinflussen.

Modellbereich	Mangel	Wirkung auf das Modellergebnis
ÖV-Angebot	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Das Verkehrsangebot passt nicht zum Analysejahr.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehler bei den Kenngrößen der Angebotsqualität beeinflussen Moduswahl.</li> </ul>
Straßennetze	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es sind keine Daten zur Kapazität der Knotenpunkte (z.B. Fahrstreifenaufweitung) verfügbar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehler bei der Ermittlung von Verlustzeiten beeinflussen Moduswahl und Routenwahl.</li> </ul>
Strukturdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strukturdaten sind nicht in der erwarteten räumlichen Auflösung oder inhaltlichen Differenzierung verfügbar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehler beeinflussen Verkehrserzeugung und Zielwahl.</li> </ul>
Zählwerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zählwerte passen nicht zum Analysejahr.</li> <li>• Zählwerte differenzieren nicht nach Pkw und Lkw.</li> <li>• Zählwerte des Tages werden aus Zählwerten einzelner Stunden hochgerechnet.</li> <li>• Zählwerte wurden nur an einem Tag erfasst.</li> <li>• Zählwerte sind entlang eines Streckenzugs nicht konsistent.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Validierung basiert auf ungenauen Zählwerten. Dies kann zu einer unangebrachten Überanpassung der Modellparameter („Model Overfitting“) führen.</li> </ul>
Externe Matrix	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Externe Nachfragedaten nicht in der erwarteten räumlichen oder zeitlichen Auflösung verfügbar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falsche Verkehrsstärken und Fahrtzeiten.</li> </ul>

Tabelle 8-7: Beispiele für Mängel bei den Eingangsdaten.

## 8.7 Kalibrierung und Validierung

Im Mittelpunkt einer Modellerstellung steht die Kalibrierung und die Validierung, bei der in mehreren Durchläufen die Modellparameter gesetzt und ihre Wirkungen auf die Modellergebnisse geprüft werden:

- **Kalibrierung:**  
Einstellung der Modellparameter, so dass die mit dem Modell berechneten Werte möglichst gut mit der beobachteten Realität übereinstimmen.
- **Validierung:**  
Überprüfung der Modellparameter, der Modellergebnisse und des Modellverhaltens mit geeigneten Gütemaßen und Tests.

### 8.7.1 Einstellen der Parameter

Ausgangspunkt für den Prozess der Kalibrierung und Validierung ist eine Startlösung, bei der alle Modellparameter mit geschätzten oder gesetzten Parametern belegt werden.

- **Parameterschätzung:**  
Bei der Parameterschätzung werden die Parameter entweder mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens bestimmt oder iterativ solange verändert, bis die Abweichungen zwischen den aus dem Modell errechneten Werten und den gemessenen Werten minimal sind. Für die Parameterschätzung von Entscheidungsmodellen der Ziel-, Modus- oder Routenwahl eignet sich die sogenannte Maximum-Likelihood-Methode. Die Methode nutzt beobachtete Wahlentscheidungen von Verkehrsteilnehmenden und die zugehörigen Eigenschaften der Menge an Alternativen. Wichtige Eigenschaften einer Alternative sind die Kenngrößen der Angebotsqualität: Zu- und Abgangszeit, Wartezeit, Fahrtzeit im Verkehrsmittel, Kosten und Umsteigehäufigkeit. Diese Kenngrößen sollten nicht aus den Angaben der Probanden abgeleitet, sondern für alle Probanden und alle Alternativen aus den Kenngrößen, die mit dem Verkehrsnachfragemodell ermittelt werden. Grundlage für die Kenngrößen sollten dabei nicht die Verkehrszellen sein, in denen die Probanden ihre Aktivitäten durchführen, sondern die genauen geocodierten Aktivitätenorte. Nur so kann der Einfluss der Zu- und Abgangszeit – diese Werte können für verschiedene Orte innerhalb einer Zelle deutlich variieren – bei der Parameterschätzung berücksichtigt werden. Die Güte einer Maximum-Likelihood-Schätzung sollte mittels des Likelihood-Ratio-Test und des rho-square-Test (siehe z.B. Huelsenbeck & Crandall [76]) dokumentiert werden.
- **Parametersetzung:**  
Parameter, die nicht empirisch erhoben werden können, müssen durch den Modellerstellenden festgesetzt werden. Sinnvolle Wertebereiche der Parameter können der Literatur (z.B. Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [26], FSUTMS-Cube Framework Phase I und II [24; 25], Studien zu Zeitkosten (z.B. Weis et al. [135] oder Axhausen et al. [3]), Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK [90]) oder anderen Modellen entnommen werden.

### 8.7.2 Überprüfung der Parameter

Das Ergebnis einer Parameterschätzung für Entscheidungsmodelle sind Parameterwerte für die in einer Nutzenfunktion verwendeten Kenngrößen. Diese Parameter geben die Bedeutung der jeweiligen Kenngröße auf die Wahlentscheidung an. Diese Werte sollten auf folgende Weise geprüft werden:

- Vorzeichen der Parameter: Die Parameterwerte zur Bewertung von Widerständen sollten in einer Nutzenfunktion ein negatives Vorzeichen haben.
- Verhältnis der Parameter: Die Parameterwerte für die Gehzeit, das Umsteigen oder die Kosten werden in Bezug gesetzt zum Parameterwert der Fahrtzeit. Diese resultierenden Verhältniswerte geben den Value of Time für eine Zeiteinheit Gehzeit, einen Umsteigevorgang oder eine Geldeinheit an, siehe Studien zu Zeitkosten (z.B. Weis et al. [135] oder Axhausen et al. [3]). Diese Vorgehensweise kann jedoch nur für Modelle mit linearen Nutzenfunktionen gewählt werden.
- Wertebereich der Parameter: Die Parameterwerte können mit Werten aus der Literatur und mit Werten aus anderen Modellen verglichen werden. Es muss aber berücksichtigt werden, dass der Wert eines Parameters von der Modellarchitektur, von der verwendeten Bewertungsfunktion (Exponentialfunktion, Potenzfunktion, Halbglockenfunktion) und von der Gesamtanzahl der Parameter in der Nutzenfunktion abhängt.

### 8.7.3 Überprüfung der Modellergebnisse

In diesem Schritt werden mit dem Modell errechnete Werte und gemessene Werte mit geeigneten Gütemaßen (siehe Kapitel 8.1) überprüft. Als Kontrolldaten dienen personenbezogene Wegedaten zum Mobilitätsverhalten aus Befragungen, netzbezogene Daten zu Verkehrsstärken an Zählstellen, Fahrtzeiten zwischen ausgewählten Punkten im Netz und im Falle von Matrixkorrekturverfahren unkorrigierte Matrizen.

#### Mobilitätsverhalten

Für die Überprüfung des Mobilitätsverhaltens der Modellstufen Verkehrserzeugung, Ziel- und Moduswahl werden beobachtete Wegedaten von Einzelpersonen gewichtet aggregiert und mit den berechneten Wegen verglichen:

- berechnete Zahl der Wege mit befragter Zahl der Wege,
- berechnete Modal-Split-Anteile der Moduswahl mit Modal-Split-Anteilen aus Befragungen, differenziert nach Entfernungsklassen,
- berechnete mittlere Reiseweiten- oder Reisezeiten mit befragten mittlere Reiseweiten- oder Reisezeiten,
- berechnete Reiseweiten- oder Reisezeitverteilung mit Reiseweiten- oder Reisezeitverteilung, die aus Befragungen abgeleitet werden.

Wegedaten aus Befragungen zum Mobilitätsverhalten können nur für den Teil der Nachfrage validiert werden, für den Befragungsdaten zur Verfügung stehen. Wünschenswert sind Befragungen, die als Erhebungsraum den gesamten Untersuchungsraum einbeziehen. Allerdings wird als Erhebungsraum

häufig nur der Planungsraum gewählt. Validiert werden die Wege der Einwohner des Erhebungsraums, die Quelle und Ziel im Untersuchungsraum umfassen. Diese Wegedaten sollten für verschiedene Segmentierungen überprüft werden:

- inhaltlich: alle Einwohner und differenziert nach Nachfragegruppe (Personengruppen und / oder Wegezwecken).
- räumlich: gesamter Untersuchungsraum und ggf. für Teilräume (Planungsraum, Stadt, Umland).

Eine Überprüfung auf der Ebene von Nachfragegruppen oder Teilräumen ist nur bei ausreichender Strichprobengröße möglich. Für eine Validierung einer Teilmenge sollten mindestens 100 Beobachtungen vorliegen.

Liegen für einen Modellraum keine Befragungsdaten vor, können Daten aus anderen Erhebungen genutzt werden (z.B. Mobilität in Deutschland MiD [91] oder Mobilität in Städten SrV [124]). Dazu werden Daten für vergleichbare Raumtypen mit einer ähnlichen Verkehrsangebotsstruktur (insbesondere ÖV-Angebot) ausgewählt. Zu Projektbeginn sollen dann aus diesen Erhebungen Erwartungswerte für das Verkehrsaufkommen, die Reiseweiten, die Reisezeiten und für die Modal-Split-Werte erarbeitet werden. Erscheinen diese Werte geeignet, um das Mobilitätsverhalten im Untersuchungsraum zu beschreiben, können sie als Näherungswerte für die Validierung genutzt werden. In diesem Fall bekommen im Untersuchungsraum erhobene Verkehrsstärken bei der Validierung eine höhere Bedeutung.

### **Verkehrsstärken und Fahrtzeiten**

Für die Überprüfung der Verkehrsstärken und Fahrtzeiten werden folgende Werte verglichen:

- berechnete Quelle-Ziel-Reisezeiten mit gemessenen Fahrtzeiten für ausgewählte Relationen,
- berechnete Verkehrsstärken der Umlegung mit gezählten Verkehrsstärken an ausgewählten Zählstellen oder an Screenlines. Eine Screenline umfasst eine Menge von Strecken, die durch einen Polygonzug definiert werden. Alle Strecken, die durch den Polygonzug geschnitten werden, gehören zur Screenline, z.B. alle Brücken über einen Fluss. Die Verkehrsstärken aller Strecken einer Screenline werden zu einer Screenline-Verkehrsstärke aufsummiert.

### **Matrixkorrektur**

Im Zuge eines Matrixkorrekturverfahrens ist auszuweisen, wie groß der Einfluss der Korrektur ist. Dies beinhaltet Aussagen zur Größenordnung der Korrektur (mit dem Gütemaß *mittlere, relative Abweichung  $r$  zwischen zwei Matrizen*) und Aussagen zur Ähnlichkeit der unkorrigierten und der korrigierten Matrizen (mit den Gütemaßen *SQV-Wert aus normierten Matrixsummen* und *mittlerer, gewichteter SQV-Wert über alle Matrixelemente*). Die Auswertung kann dabei wie folgt durchgeführt werden:

- für Matrizen des Verkehrsaufkommens (Nachfragematrizen) und Matrizen der Verkehrsleistung bzw. des Verkehrszeitaufwandes,
- getrennt für Planungsraum und Einflussraum sowie für alle relevanten Teilräume des Untersuchungsraumes (z.B. Landkreise),

- für alle Korrekturen sowie getrennt für positive und für negative Korrekturen.

Ergänzend bietet sich die Darstellung eines Differenzplots aus der Umlegung der Matrizen vor und nach der Korrektur an (siehe Kapitel 8.4.5). Da der Einfluss der Routenwahl für diesen Vergleich möglich geringgehalten werden soll, ist als Umlegungsart eine Bestwegumlegung zu wählen.

- Der Differenzplot und die Analysen von Teilräumen geben Hinweise darauf, wo z.B. Korrekturmatrizen sehr stark wirken. Dadurch ergeben sich beispielsweise Hinweise, wo die Verkehrserzeugungsparameter überprüft werden müssen.
- Optional kann die  $SQV$ -Statistik für das Umlegungsergebnis bestimmt werden, wobei  $c$  die Verkehrsstärken aus der umgelegten Referenzmatrix und  $m$  die Verkehrsstärken aus der umgelegten Vergleichsmatrix darstellt. Der Skalierungsfaktor  $f$  sollte entsprechend Tabelle 8-3 gewählt werden.

### Empfehlungen zur Überprüfung der Modellergebnisse

Tabelle 8-8 zeigt einen Vorschlag für die Überprüfung der Modellergebnisse mit wichtigen Kenngrößen, Vorschlägen für eine räumliche und inhaltliche Differenzierung sowie entsprechenden Gütemaßen.

	Kenngröße	Differenzierung		Kontrolldaten	statistisches Gütemaß
		inhaltlich	räumlich		
Verkehrsaufkommen	mittlere Anzahl Wege pro Person	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Einwohner</li> <li>• pro Modus</li> <li>• pro NGruppe</li> <li>• pro Modus x NGruppe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gesamter UR</li> <li>• Teilräume</li> </ul>	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gütemaß <math>SQV^{36}</math> für <math>f = 1</math></li> </ul>
Verkehrsleistung	Reiseweitenverteilung [km] pro Weg	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Einwohner</li> <li>• pro Modus</li> <li>• pro NGruppe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gesamter UR</li> </ul>	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mittlere Reiseweite pro Weg: Gütemaß <math>SQV^{36}</math> für <math>f = 10</math></li> <li>• Reiseweitenverteilung<sup>37</sup>: Coincidence Ratio <math>\geq 0,7</math></li> </ul>
	mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Einwohner</li> <li>• pro Modus</li> <li>• pro NGruppe</li> <li>• Modus ÖV</li> <li>• ÖV-Betriebszweige</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gesamter UR</li> <li>• Teilräume</li> </ul>	HH-Bef ÖV-Erhebung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mittlere Reiseweite pro Tag: Gütemaß <math>SQV^{36}</math> für <math>f = 10</math></li> </ul>
Verkehrszeitaufwand	Reisezeitverteilung [min] pro Weg	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Einwohner</li> <li>• pro Modus</li> <li>• pro NGruppe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gesamter UR</li> </ul>	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mittlere Reisezeit pro Weg: Gütemaß <math>SQV^{36}</math> für <math>f = 30</math></li> <li>• Reisezeitverteilung<sup>37</sup>: Coincidence Ratio <math>\geq 0,7</math></li> </ul>
	mittlerer Verkehrszeitaufwand [min] pro Person	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Einwohner</li> <li>• pro Modus</li> <li>• pro NGruppe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gesamter UR</li> </ul>	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mittlere Reisezeit pro Tag: Gütemaß <math>SQV^{36}</math> für <math>f = 100</math></li> </ul>

<sup>36</sup> Für die Einordnung des Gütemaßes in Qualitätsbereiche siehe Tabelle 8-5 auf Seite 183.

<sup>37</sup> Zur Beurteilung von Verteilungen siehe Kapitel 8.4.3 und Anlage 2.5

	Kenngröße	Differenzierung		Kontrolldaten	statistisches Gütemaß
		inhaltlich	räumlich		
<b>Verkehrsstärke</b>	tägliche und stündliche Verkehrsstärke	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pkw</li> <li>• Lkw</li> <li>• Rad</li> <li>• Bus</li> <li>• Bahn</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Screenline</li> <li>• Strecke</li> <li>• Abbieger</li> <li>• Strecke einer Linienroute</li> <li>• Haltestellen</li> </ul>	Zählung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tageswerte: Gütemaß <math>SQV^{36}</math> für <math>f = 10.000</math></li> <li>• Stundenwerte: Gütemaß <math>SQV^{36}</math> für <math>f = 1.000</math></li> </ul>
<b>Matrixkorrektur</b>	mittlere Anzahl Wege pro Person in der Matrix nach Matrixkorrektur	• pro Modus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gesamter UR</li> <li>• Teilräume</li> </ul>	Matrix vor Matrixkorrektur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausweisung jeweils für alle Korrekturen und gesondert für positive und negative Korrekturen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• mittlere, relative Abweichung <math>r</math> zwischen den Matrizen</li> <li>• Gütemaß <math>SQV</math> aus normierten Matrixsummen <math>^{36}</math> für <math>f = c</math></li> <li>• optional: mittlerer, gewichteter <math>SQV</math> über alle Matrixelemente <math>^{36}</math></li> </ul> </li> </ul>
	mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person in der Matrix nach Matrixkorrektur				
	Verkehrsstärke, aus Bestwegumlegung der Matrizen vor und nach der Korrektur	• pro Modus	• gesamter UR	Matrix vor Matrixkorrektur	
<b>Fahrzeiten</b>	Fahrzeiten zwischen zwei Punkten im Netz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• unbelastetes Netz</li> <li>• belastetes Netz für relevante Tageszeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Streckenzug</li> <li>• Relationen</li> </ul>	Fahrzeitmessung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• absolute Abweichungen nach Abbildung 8-4</li> </ul>
<p>HH-Bef: Haushaltsbefragung mit Wegetagebüchern. Die Datensätze sollten gewichtet vorliegen. Für die Validierung werden alle Wege der Einwohner im Erhebungsraum der Haushaltsbefragung genutzt. Es werden nur solche Wege als Kontrolldaten berücksichtigt, die im Untersuchungsraum beginnen und enden.</p> <p>ÖV-Erhebung: Quelle-Ziel-Befragungen im ÖV-Fahrzeug, die mit Einsteigerzählungen hochgerechnet werden oder aus Fahrkartendaten abgeleitete Verkehrsleistung.</p> <p>UR: Untersuchungsraum, in dem die Verkehrsnachfrage modelliert wird.</p> <p>NGruppe: Nachfragegruppe (Personengruppe und / oder Wegezweck)</p> <p>Alle Kenngrößen beziehen sich auf einen Tag.</p>					

Tabelle 8-8: Empfehlungen zur Überprüfung der Modellergebnisse.

### Weitere Prüfungsmöglichkeiten

Die Überprüfung der Modellergebnisse nach Tabelle 8-8 basiert immer auf dem Vergleich von modellierten Daten und Kontrolldaten. Zusätzlich ist eine Überprüfung von Modellergebnissen ohne Kontrolldaten möglich und sinnvoll:

- Überprüfung der Modal-Split-Werte auf Zellenebene durch sortieren der Werte oder einer farblichen Klassierung in einer Karte. Gibt es Zellen mit sehr hohen oder sehr niedrigen Werten?
- Überprüfung der Auslastung der Strecken und ÖV-Linien. Gibt es Netzelemente mit sehr hohen Auslastungen? Gibt es ÖV-Linien mit einer sehr geringen Auslastung oder sehr wenigen Linienbeförderungsfällen? Gibt es im Kfz-Verkehr Strecken mit einer für die Straßenklasse sehr geringen Auslastung bzw. Verkehrsstärke?

### 8.7.4 Überprüfung des Modellverhaltens

Mit **Sensitivitätstests** wird der Einfluss der Modellparameter auf das Ergebnis geprüft. Dabei werden die Modellvariablen – in der Regel die Modellvariablen des Analysefalls – unverändert gelassen, so dass Ergebnisänderungen auf einzelne Parameter zurückgeführt werden können. Als Auswertungsgrößen können die in Tabelle 8-8 beschriebenen Kenngrößen herangezogen werden, jeweils mit Bezug auf die Erhebungsdaten. Eine Variation der Parameterwerte sollte besonders für folgende Parameter angestrebt werden:

- Empirisch nicht abgesicherte Parameter der Nutzenfunktion:  
Parameterwerte von Kenngrößen, die nicht oder nur eingeschränkt geschätzt werden können, sollten einmal reduziert und einmal erhöht werden. WebTAG [37] schlägt eine Reduktion bzw. Erhöhung um 25% bis 50% vor. Das gilt häufig für Parameter der Zahlungsbereitschaft und andere Parameter, die „nur“ mit einer Stated-Choice Befragung ermittelt werden konnten. Die Ergebnisse dieser Variationen können als Elastizitäten der untersuchten Parameter ausgedrückt werden, z.B. die Erhöhung der Parameters Zeitwert um  $x$  % reduziert die Pkw-Fahrleistung um  $y$  %.
- Abbruchbedingungen für die Gleichgewichtsumlegung:  
Strengere Abbruchbedingungen bei einer Gleichgewichtsumlegung (siehe Kenngröße Relative Gap in Abbildung 5-12 auf Seite 97) erhöhen die Modellkonvergenz auf Kosten der Rechenzeit. Um Aussagen über den Einfluss der Abbruchbedingungen auf das Ergebnis machen zu können, sollten die maximale Iterationszahl deaktiviert und das geplante Abbruchkriterium um den Faktor 10 verschärft und vermindert werden (z.B. maximaler zulässiger Relative Gap wird von 0,0001 auf 0,00001 bzw. auf 0,001 geändert).
- Abbruchbedingungen für die Rückkopplung zwischen den Modellstufen:  
Ähnlich wie bei den Abbruchbedingungen für Gleichgewichtsberechnungen erhöhen strengere Abbruchbedingungen die Modellkonvergenz auf Kosten der Rechenzeit. Um zu zeigen, dass das Nachfragemodell tatsächlich konvergiert, sollte zunächst eine Berechnung ohne maximale Rückkopplungsanzahl durchgeführt werden. In einem zweiten Test sollte das geplante Abbruchkriterium um den Faktor 10 verschärft und vermindert werden, um Aussagen über den Einfluss der Konvergenz auf das Ergebnis zu machen (z.B. maximaler zulässiger *TMF*-Wert wird von 0,01 auf 0,001 bzw. auf 0,1 geändert).

Mit **Realitätstests** wird geprüft, ob die Wirkungen eines Modells bei Änderungen der Variablen in der erwarteten Größenordnung liegen. Dazu werden die Variablen des Verkehrsangebots oder die Siedlungsstrukturdaten in kontrollierter Weise verändert. Dann werden die Nachfrageänderungen ermittelt. Ein Maß dafür, wie stark sich die Nachfrage in Abhängigkeit der Variablenänderung verändert, sind Elastizitäten. Aus dem Vergleich der Variablenänderungen und der Nachfrageänderungen lassen sich Elastizitäten der Zeit oder des Preises berechnen und mit erwarteten Elastizitäten vergleichen.

Rieser et al. [107] stellen verschiedene Realitätstests inklusive der Vorgehensweise, der zu erwartenden Ergebnisse und beispielhaften Auswertungen vor. Eine kurze Zusammenfassung dazu findet sich in Anlage 2.2.2. Folgende Variablenänderungen werden für einen Realitätstest empfohlen:

- Veränderung der Einwohnerzahl,

- Veränderung der Bedienungshäufigkeit im ÖV,
- Veränderung der Kraftstoffkosten, Parkkosten, Mautkosten oder ÖV-Ticketkosten, sofern das Modell solche Preisstrukturen abbildet.

Nach WebTAG [37] berechnet sich die Preiselastizität  $\varepsilon$  nach:

$$\varepsilon = \frac{\ln\left(\frac{\text{Nachfrage}_{\text{nachher}}}{\text{Nachfrage}_{\text{vorher}}}\right)}{\ln\left(\frac{\text{Kosten}_{\text{nachher}}}{\text{Kosten}_{\text{vorher}}}\right)}$$

und sollte folgende Werte aufweisen:

- Treibstoffkosten (bezogen auf die Fahrzeugkilometer): -0,35 bis -0,25,
- ÖV-Ticketpreise (bezogen auf die Wegeanzahl): -0,9 bis -0,2 (bzw. -0,9 bis -0,7 für Bus),
- Reisezeit (MIV, bezogen auf die Wegeanzahl): nicht kleiner als -2,0.

Außerdem sollte ein Realitätstest durchgeführt werden, bei dem die Wirkung der Kapazitätsänderung eines Netzelements (z.B. Neubau einer Straße) einmal ohne Rückkopplung (nur Umlegung) und einmal mit Rückkopplung (Nachfrageberechnung und Umlegung) untersucht wird. Auf welchen Relationen erhöhen bzw. reduzieren sich daraufhin die Reisezeiten? Sind sich ergebende Änderungen der Verkehrsstärken – differenziert nach Pkw und Lkw – auch in größerer Entfernung vom untersuchten Netzelement erklärbar oder eher auf eine unzureichende Konvergenz zurückzuführen? Ergänzend kann auch auf die in Tabelle 8-8 beschriebenen Gütemaße zurückgegriffen werden. Im Falle von Realitätstests sind die Referenzgrößen allerdings nicht die Erhebungsdaten, sondern der (bisherige) kalibrierte Ausgangszustand.

Mit **Konsistenztests** wird geprüft, ob das Modell Anforderungen erfüllt, die sich aus der Logik von Ortsveränderungen ergeben. Die Konsistenzanforderungen sollten mit folgenden Tests überprüft werden:

- Bilanzierung der Ortsveränderungen:  
Die Zahl der Ortsveränderungen, die eine Zelle im Laufe eines Tages verlassen, muss mit der Zahl der ankommenden Ortsveränderungen übereinstimmen. Das gilt sowohl für den gesamten Verkehr der Verkehrszelle als auch für Teilmengen (Ortsveränderungen einer Personengruppe oder Ortsveränderungen der Pkw).
- Bilanzierung der Nachfrage mit den Siedlungsstrukturdaten:  
Bei Pflichtaktivitäten (z.B. Arbeiten) unterliegt die Zielwahl der Akteure (z.B. Beschäftigte) zusätzlichen Randbedingungen. Jeder Arbeitsplatz muss unabhängig von der räumlichen Lage mit der gleichen Wahrscheinlichkeit aufgesucht werden.
- Proportionalität der Routenbelastungen:  
Diese Bedingung fordert, dass die Nachfrage, die über eine Netzmasche mit zwei alternativen Routen abgewickelt wird, unabhängig von der Quelle und dem Ziel immer mit einem einheitlichen Verhältnis, d.h. proportional, auf die zwei Routen der Netzmasche aufgeteilt wird (siehe

Abbildung 5-11 auf Seite 96). Diese Prüfung ist dann von Bedeutung, wenn Knotenströme des Modells für die Bemessung von Knotenpunkten genutzt werden sollen.

- Vorgelagerte Zielwahl bei Pflichtaktivitäten:  
Aktivitäten von Menschen lassen sich in Aktivitäten unterteilen, die an einem vorgegebenen Standort oder an einem flexiblen Standort durchgeführt werden. Der Standort von Pflichtaktivitäten (Arbeiten, Ausbildung) wird langfristig gewählt und lässt sich nicht kurzfristig anpassen. Das ist bei Nicht-Pflichtaktivitäten (Freizeit, Einkauf, private Erledigung) anders, da hier meist mehrere Aktivitätsorte zur Auswahl stehen. Deshalb sollte das Nachfragemodell bei der Zielwahl zwischen Pflichtaktivitäten und Nicht-Pflichtaktivitäten unterscheiden (siehe Simon et al. [118]). Um diese Konsistenzanforderung bei Aktivitätenkettenmodellen zu prüfen, wird die Folge von Aktivitäten in einer Aktivitätenkette getauscht (Wohnen-Arbeit-Einkauf-Wohnen → Wohnen-Einkauf-Arbeit-Wohnen). Die resultierenden Nachfragematrizen sollten in beiden Fällen identisch sein.

Bei der Überprüfung des Modellverhaltens sollte außerdem die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse geprüft werden. Zwei Modellläufe sollten bei Nutzung der gleichen Version der Modellierungssoftware ein identisches Ergebnis liefern. Für Abweichungen gibt es mehrere mögliche Gründe:

- Fehlende Initialisierung: Zum Beginn eines Modelllaufs müssen alle Inputdaten mit Ausgangswerten initialisiert werden. Alle Kenngrößenmatrizen und die zu berechnenden Nachfragematrizen sollten mit 0 initialisiert, die Umlegungsergebnisse gelöscht werden. Für die erste Umlegung können vorgegebene Startmatrizen genutzt werden.
- Unterschiedliche Versionen des Betriebssystems oder unterschiedliche Rechnerarchitekturen verändern das Ergebnis aufgrund anderer Rundungsvorschriften. Um diese Fehlerursache auszuschließen, muss auf jedem neuen Rechner der Analyse- oder der Bezugsfall des Modells erneut gerechnet und die Ergebnisse der beiden Rechner verglichen werden.
- Nutzung unterschiedlicher Speichermedien: Daten können in Abhängigkeit des Speichermediums unterschiedliche Werte annehmen. Eine Zahl mit Nachkommastellen wird beim Speichern in einer Textdatei mit einer gewissen Anzahl von Nachkommastellen geschrieben. In einer Binärdatei oder im Arbeitsspeicher des Computers wird dieselbe Zahl möglicherweise durch mehr Nachkommastellen repräsentiert. Geringe Unterschiede können beispielsweise bei einer Bestwegsuche zu anderen Routen oder bei Entscheidungsmodellen zu anderen Anteilen führen und so das Ergebnis beeinflussen.

## Hinweise und Empfehlungen zur Überprüfung des Modellverhaltens

### Allgemein

#### Hinweise

- Die Ergebnisse von Sensitivitäts- und Realitätstests müssen immer im Modellkontext interpretiert werden und sind alleinstehend nicht aussagekräftig. Die Ergebnisse der unten aufgeführten Realitätstests werden sich in schwach und stark ausgelasteten Räumen unterscheiden.
- Sensitivitätstests:  
Parameter von Nutzenfunktionen sind multiplikativ mit den jeweiligen Variablen verbunden. Daher sollte eine Veränderung des Parameters dieselbe Wirkung erzielen, wie eine gleichwertige Veränderung der entsprechenden Variablenausprägung. Beispiel: Eine Erhöhung der Kostenparameter um 50% sollte die gleiche Wirkung im Nachfragemodell haben wie eine Preiserhöhung um 50%.

#### Empfehlungen

- Sensitivitätstests
  - Gleichgewichtsumlegung: Das geplante Abbruchkriterium sollte um den Faktor 10 verschärft werden (z.B. Relative Gap von 0,0001 auf 0,00001). Dann sollen die Abweichungen bei den Verkehrsstärken verglichen werden.
  - Rückkopplung: Das geplante Abbruchkriterium sollte um den Faktor 10 verschärft werden (z.B. Total Misplaced OD Flow TMF). Dann sollen die Abweichungen mit Hilfe der Kenngrößen aus Tabelle 8-8 verglichen werden.
- Realitätstests:
  - Variation der Einwohnerzahl:  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 50\%$
  - Variation der Bedienungshäufigkeit: Reduktion auf 50%, jede zweite Fahrt löschen
  - Variation der Streckenkapazität für ausgewählte Netzelemente: z.B. eine Autobahnanschlussstelle oder eine Brücke sperren
  - Variation der MIV-Nutzungsgebühren: +50%
  - Variation der ÖV-Nutzungsgebühren: +50%, kostenloser ÖV
 Zur Quantifizierung werden Elastizitäten empfohlen (siehe Anlage 2.2).
- Konsistenztests:
  - Bilanzierung der Ortsveränderungen.
  - Bilanzierung der Nachfrage mit den Siedlungsstrukturdaten.
- Überprüfung der Reproduzierbarkeit: Vergleich der Modellläufe auf zwei Rechnern und auf jedem neuen Rechner, der in einem Projekt genutzt wird.

#### Optional

- Sensitivitätstests:  
Variation von gesetzten (nicht-empirischen) Parametern
- Realitätstests:  
Weitere Tests für Maßnahmenkategorien, die in der Modellanwendung relevant sind, z.B. Fahrradwiderstand variieren, um veränderte Fahrradgeschwindigkeit zu simulieren.
- Konsistenztests:
  - Proportionalität der Routenbelastungen.
  - Vorgelagerte Zielwahl bei Pflichtaktivitäten bei Aktivitätskettenmodellen

Tabelle 8-9: Empfehlungen zur Überprüfung des Modellverhaltens.

### 8.7.5 Abschließende Validierung der Modellergebnisse

Nach dem Abschluss des Kalibrierungs- und Validierungsprozesses liegt ein geprüftes Modell vor. Um die Qualität dieses Modells nachzuweisen, können die Modellergebnisse nun mit einem bis zu diesem Zeitpunkt unbenutzten Datensatz überprüft werden. Bei der Überprüfung mikroskopischer Verkehrsflussmodelle [47] lässt sich ein Datensatz für einen weiteren Kontrollzustand zum Beispiel durch Reisezeitmessungen zu einer anderen Tageszeit relativ leicht erzeugen. Bei makroskopischen Modellen, die meist die mittlere Verkehrsnachfrage an einem Werktag außerhalb der Ferien abbilden, ist es schwer, einen weiteren, unbenutzten Datensatz zu erhalten. Im einfachsten Fall kann man Verkehrsstärken anderer Zählstellen heranziehen. Eine andere, aufwändigere Vorgehensweise besteht in einem Backcasting, bei dem die Modellvariablen in einen definierten Zustand der Vergangenheit gesetzt werden und die Modellergebnisse mit Verkehrsstärken oder Mobilitätskenngrößen zugehöriger Verkehrserhebungen verglichen werden.

Die Durchführung einer abschließenden Validierung ist sicher wünschenswert, es stellt sich aber unweigerlich die Frage nach der Konsequenz, wenn der abschließende Validierungstest negativ ausfällt. Ein erneutes Kalibrieren verbietet sich, da dies erstens nicht Zweck dieses Tests ist und zweitens der Datensatz in diesem Fall von Anfang an zu Kalibrierungszwecken hätte verwendet werden können. Ein simples Ignorieren des Testergebnisses rechtfertigt seine Anwendung ebenso wenig. Konsequenterweise müsste bei einem negativen Ausgang das komplette Verkehrsnachfragemodell verworfen werden, um seine Modellspezifikationen grundlegend neu zu definieren. In der Praxis gibt es diese Fälle durchaus. Sie treten immer dann ein, wenn ein Modellanwender in seiner Rolle als Auftraggeber das von einem Modellersteller angefertigte Modell nicht abnimmt. Meist sind sie die Folge einer ungenauen Modellspezifikation und einer nachlässigen Modellüberprüfung.

## 8.8 Abschätzung der Prognosegenauigkeit

Ein Verkehrsnachfragemodell ermittelt als Ergebnis eine Vielzahl von Kenngrößen, die in der Planung benötigt werden. Wichtige Kenngrößen sind u.a. modusspezifische Verkehrsstärken, der Verkehrsentrfernungsaufwand (Personen- und Fahrzeugkilometer) und der Verkehrszeitaufwand (Personen- und Fahrzeugstunden). Verkehrsentrfernungsaufwand und Verkehrszeitaufwand ergeben sich unmittelbar aus dem Produkt aus Verkehrsstärke und Länge bzw. Zeit. Für alle Kenngrößen wird genau ein Wert ermittelt. Deshalb werden Prognosen mit einem makroskopischen Verkehrsnachfragemodell als Punktprognosen bezeichnet. Bei einer Punktprognose gilt für den Wert der Kenngröße  $m$ :

$$m_{\text{Prognose}} = m_{\text{Modell}}$$

### Fehlerarten

So wie Messwerte und Modellwerte im Analysefall abweichen, wird es auch im Bezugsfall Abweichungen geben. Um den Prognosefehler zu quantifizieren, lassen sich zwei Fehlerarten unterscheiden, die beide zum Prognosefehler beitragen:

- Fehler bei den Prognoseannahmen (z.B. Einwohnerzahlen, Preisentwicklung). Dieser Prognoseannahmefehler kann zum Teil durch Sensitivitätstest in der Größenordnung eingegrenzt werden. Er wird im Folgenden als  $f_a^P$  für den absoluten und  $f_r^P$  für relativen Prognoseannahmefehler bezeichnet.
- Fehler, die bereits im Analysefall enthalten sind und sich aus Abstraktionsfehlern, Implementierungsfehlern, Messfehlern und Stichprobenfehlern ergeben. Bei Verkehrsstärken kann dieser mittlere Modellfehler differenziert nach Straßenklassen oder nach Verkehrsstärkeklassen ermittelt werden. Der Modellfehler wird dann aus der Analyse in die Prognose übertragen. Dazu muss ein mittlerer Modellfehler für den Analysefall bestimmt werden. Der absolute Modellfehler wird im Folgenden als  $f_a^M$  bezeichnet. Um den mittleren Modellfehler  $f_a^M$  zu bestimmen, werden unten drei mögliche Ansätze vorgestellt, die auf dem  $SQV$ , dem  $RMSE$  oder dem  $\%RMSE$  basieren.

### Unsicherheiten bei den Prognoseannahmen

Jeder Sensitivitätstest liefert eine Punktprognose für eine Menge angenommener Variablenwerte. Damit kann für jedes Netzelement eine Abweichung zwischen der Modellprognose ohne und mit Sensitivitätsannahmen ermittelt werden. Für den  $t$ . Sensitivitätstest ergibt sich jedes Netzelement folgende relative Abweichung:

$$f_{r,t}^P = \frac{m_{Prognose,t}}{m_{Prognose}}$$

Diese Abweichung kann für mehrere Sensitivitätstests vereinfachend multiplikativ verknüpft werden, wenn die Sensitivitätstests voneinander unabhängige Variablen variieren. Da die in einem Verkehrsnachfragemodell abgebildeten Wirkungszusammenhänge bei der Zielwahl, Modulwahl und Routenwahl nicht linear sind, ist es aber immer besser auf multiplikative Verknüpfungen zu verzichten und stattdessen Sensitivitätstests zu definieren, die wahrscheinliche Kombinationen von Variablenausprägungen nutzen. Der Sensitivitätstest, der die geringste bzw. die höchste Verkehrsleistung im Netz ergibt, wird  $f_{r,t=MIN}^P$  bzw.  $f_{r,t=MAX}^P$  benannt.

### Modellfehler aus dem Gütemaß $SQV$

Wird ein Analysefall mit dem Gütemaß  $SQV$  geprüft, kann der absolute Fehler mit folgender Formel bestimmt werden.

$$f_a^M = \frac{(1 - g_{SQV}) \sqrt{f} \sqrt{m_{Prognose}}}{g_{SQV}}$$

Dabei wird für  $g_{SQV}$  entweder das mittlere Gütemaß des Analysefalls herangezogen oder der Wert, der von allen Messwerten eingehalten werden muss (z.B. 0,90 oder 0,85).

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die Größe des Modellwerts bei der Fehlerermittlung berücksichtigt wird. Für jeden Modellwert gibt es einen spezifischen Fehlerwert, sowohl für den absoluten Fehler als auch für den relativen Fehler.

### Modellfehler aus dem *RMSE*

Der *RMSE* ergibt sich aus der Abweichung aller Messwerte  $c$  und Modellwerte  $m$  im Analysefall. Der *RMSE* entspricht einer mittleren Standardabweichung. Multipliziert man die Standardabweichung mit dem Konfidenzoeffizienten  $z$ , erhält man den zu erwartenden Modellfehler für ein Signifikanzniveau. Sammer verwendet hierfür den Wert  $z = 1,96$  [109], was einem Signifikanzniveau von 0,05 entspricht, d.h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,05 ist der Fehler größer. Dieses Sicherheitsniveau führt allerdings zu einem großen absoluten Fehler. Wird im Analysefall ein Stichprobenfehler von  $z = 1,0$  gesetzt, kann das auch für den Bezugsfall angenommen werden. Damit ergibt sich folgende Formel für den absoluten Fehler:

$$f_a^M = z \cdot RMSE(c, m) \xrightarrow{z=1.0} f_a^M = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (c_n - m_n)^2}{N}}$$

Bei dieser Methode wird die Größe des Modellwerts bei der Fehlerermittlung nicht berücksichtigt. Alle Modellwerte einer Größenklasse bekommen den gleichen absoluten Fehler zugeordnet. Damit wird der Modellfehler von der Größenklasseneinteilung bestimmt.

### Modellfehler aus dem *%RMSE*

Wird anstelle des *RMSE* der prozentuale *RMSE* verwendet, ergibt sich der folgende absolute Fehler:

$$f_a^M = m_{Prognose} \cdot \%RMSE(c, m) = m_{Prognose} \cdot \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - y_n)^2}{N}}}{\frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}}$$

Bei dieser Methode wird für alle Modellwerte ein einheitlicher relativer Fehler angenommen. Der absolute Fehler hängt vom Modellwert ab.

### Umgang mit der Prognoseungenauigkeit

Mit den oben beschriebenen Fehlern kann nun für jedes Netzelement ein unterer und ein oberer Prognosewert bestimmt werden:

- unterer Prognosewert ohne Prognoseannahmefehler:

$$m_{Prognose}^- = (m_{Modell} - f_a^M)$$

- unterer Prognosewert mit Prognoseannahmefehler:

$$m_{Prognose}^- = \left( m_{Modell} - f_a^M \right) \cdot f_{r,t=MIN}^P$$

- oberer Prognosewert ohne Prognoseannahmefehler:

$$m_{Prognose}^+ = \left( m_{Modell} + f_a^M \right)$$

- oberer Prognosewert mit Prognoseannahmefehler:

$$m_{Prognose}^+ = \left( m_{Modell} + f_a^M \right) \cdot f_{r,t=MAX}^P$$

Modellanwender und Modellnutzer müssen gemeinsam entscheiden, welche Fehler bei einer Modellanwendung berücksichtigt werden sollen. In jedem Fall sollten die Wirkungen ermittelt werden, die sich aus einer Modellanwendung mit einer Punktprognose ergeben. Diese Ergebnisse können dann mit den Wirkungen verglichen werden, die sich mit Prognosefehlern ergeben:

- Modellanwendungen, bei denen Erlöse aus Fahrgeldern oder Straßenbenutzungsgebühren ermittelt werden sollen, sollten die unteren Prognosewerte verwenden.
- Anwendungen, die Verkehrsstärken für Leistungsfähigkeitsuntersuchungen, Lärm oder Schadstoffemissionen ermitteln, sollten die oberen Prognosewerte verwenden.
- Anwendungen, die Wirkungen für volkswirtschaftliche Untersuchungen ermitteln, sollten die Wirkungen sowohl mit unteren als auch mit oberen Prognosewerten ermitteln.

Bisher basieren nahezu alle Verkehrsprognosen auf Punktprognosen, die keine Prognosefehler berücksichtigen. Deshalb liegen derzeit noch keine praktischen Erfahrungen über den Umgang mit Prognosefehlern vor. Prognosefehler können in der Planungspraxis zu Problemen führen. Es können Fälle auftreten, in denen eine Maßnahme ohne Prognosefehler geeignet, mit Prognosefehler aber ungeeignet ist. Die transparente Angabe von Unsicherheiten kann für die Planung zwar hilfreich sein, in der Kommunikation mit politischen Entscheidern und Bürgern aber zu Verunsicherung führen.

## 9 Anforderungen an die Dokumentation

Die Dokumentation eines Verkehrsnachfragemodells ist eine notwendige Voraussetzung, um der Forderung nach Transparenz und Reproduzierbarkeit gerecht zu werden. Wie beim Modellaufbau und der Modellkalibrierung gibt es auch Anforderungen an die Modelldokumentation. Generell sollten alle Teilbereiche des Verkehrsnachfragemodells wie Einsatzbereiche (Kapitel 4), Modellaufbau (Kapitel 5), Datengrundlage (Kapitel 6) und Modellvalidierung (Kapitel 8) dokumentiert werden. Aus diesem Grund orientiert sich der Aufbau der Dokumentation an der Kapitelstruktur dieses Berichts, ergänzt um einige allgemeinere Informationen.

Ob und in welchem Umfang die Dokumentation veröffentlicht wird, ist vom Auftraggeber in jedem Fall selbst zu entscheiden. Die vorliegende Beschreibung bezieht sich auf die Dokumentation des Auftragnehmers für den internen Gebrauch des Auftraggebers.

Eine Dokumentation kann je nach Zielgruppe und Zweck der Dokumentation folgende Ausprägungen haben:

- Modellhandbuch:

Dieser Bericht hat zum Ziel, den Modellaufbau (inklusive aller Annahmen und Teilmodelle) zu dokumentieren. Dazu gehört auch, die Einsatzbereiche und die Einschränkungen des Modells zu klar benennen. Diese Art des Berichts wird für folgende Zielgruppen erzeugt:

- Modellersteller, d.h. Personen, die das Nachfragemodell verändern oder weiterentwickeln wollen bzw. die das Modell in der Tiefe verstehen wollen.
- Modell Anwender, d.h. Personen, die mit einem kalibrierten Modell arbeiten wollen.
- (optional eine Kurzfassung für reine Ergebnisnutzer, d.h. Personen, die nur mit den Ergebnissen des Modells arbeiten, ohne das Modell vorliegen zu haben bzw. ohne Fachkenntnis im Bereich der Verkehrsmodellierung).

- Kalibrierungs- und Validierungsbericht:

Um die Bedeutung des Kalibrierungs- und Validierungsprozesses zu erhöhen, sollte der Validierungsteil aus dem *Modellhandbuch* ausgelagert und als eigenständiger Bericht verfasst werden. Diese Art des Berichts wird für folgende Zielgruppen erzeugt:

- Modellierer, d.h. Personen, die das Nachfragemodell verändern oder weiterentwickeln wollen bzw. die das Modell in der Tiefe verstehen wollen.
- Modell Anwender, d.h. Personen, die mit einem kalibrierten Modell arbeiten wollen.

Für beide Dokumentationsarten werden Vorlagen in Anlage 4 bereitgestellt.

## 9.1 Modellhandbuch

### 9.1.1 Allgemeine Informationen

Eine Modelldokumentation sollte zunächst allgemeine Informationen bereitstellen. Dazu zählen:

- Bezeichnung des Verkehrsnachfragemodells (inkl. Versionsnummer)
- Bezeichnung des Berichts (inkl. Versionsnummer)
- Auftraggeber:  
Organisation, Kontaktadresse, verantwortliche Personen, Kontaktpersonen (Name, Telefonnummer, E-Mail)
- ggf. finanzierende Institution
- Verkehrsnachfragemodellersteller und Anwender:  
Organisation, Kontaktadresse, verantwortliche Personen, Kontaktpersonen (Name, Telefonnummer, E-Mail)
- Beauftragungs- und Fertigstellungsdatum (Monat, Jahr)
- Verwendete Software (Bezeichnung, Hersteller, Version, Kontaktadresse)
- Verfügbarkeit des Verkehrsnachfragemodells inkl. Rahmenbedingungen (Weitergabe an Dritte, Datenschutz etc.)

### 9.1.2 Ausgangslage, Problemanalyse und Ziele

Dieser Teil der Dokumentation gibt dem Leser einen Einblick in den verkehrlichen Hintergrund des Untersuchungsraumes. Folgende Themen können hier aufgegriffen werden:

- Drängende Fragestellungen im Verkehrsplanungskontext
- Verweis auf bestehende relevante Verkehrsmodelle
- Notwendigkeit des zu erstellenden Verkehrsnachfragemodells
- Anforderungen an das zu erstellende Verkehrsnachfragemodell
- Funktionalitäten und Einsatzbereiche des zu erstellenden Verkehrsnachfragemodells

### 9.1.3 Einsatzbereiche des Verkehrsnachfragemodells und gewünschte Modellergebnisse (siehe Kapitel 4)

Die Einsatzbereiche und die Einschränkungen des Modells sind zu klar benennen. Dazu gehören:

- der gewünschte Modellaufbau (siehe Kapitel 2.2):
  - Abbildung von Personen- und Wirtschaftsverkehr (siehe Kapitel 2.2.1)
  - Modellstufen und Rückkopplungen (siehe Kapitel 2.2.3)
  - Synthetische und inkrementelle Modelle (siehe Kapitel 2.2.4)

- Makroskopische und mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle (siehe Kapitel 2.2.5)
- Statische und dynamische Modelle (siehe Kapitel 2.2.6)
- Einzelweg- und Wegekettenmodelle (siehe Kapitel 2.2.7)
- der Detailgrad des Modells (siehe Kapitel 4.1):
  - Aussagegegenstand des Modells  
(Gesamtverkehr / Personenverkehr / Wirtschaftsverkehr / Eventverkehr / externer Verkehr)
  - Modellausdehnung (Untersuchungsraum / Planungsraum) inkl. der zu modellierenden Verkehre  
(Städtisch-regionaler Verkehr / Fernverkehr / Gesamtverkehr)
  - abzubildende Modi und Fahrzeugklassen
- die Festlegung Bezugszeitraum (siehe Kapitel 4.2):
  - Zeithorizonte (Analyse- und Prognosejahr)
  - Zeiträume / Bezugswochentag der Verkehrsnachfrage / saisonaler Bezugszeitraum / Verkehrsart (Spitzenverkehr, Durchschnittsverkehr)
- die abzubildenden Entwicklungen und Maßnahmen (siehe Kapitel 4.3)
- der gewünschter Modelloutput (siehe Kapitel 4.4)

Es sollte dargestellt werden, welche Arbeitsschritte im Modellerstellungsprozess nötig sind, um die oben beschriebenen Anforderungen zu erfüllen. Die in der Ausschreibung geforderten Testszenarien und Qualitätsprüfungen (mit zugehörigen Zielwerten) sollten ebenfalls erwähnt werden.

#### **9.1.4 Aufbau des Verkehrsnachfragemodells (siehe Kapitel 5)**

Dieser Teil der Dokumentation erläutert detailliert den Aufbau, die Wirkungszusammenhänge und die Datengrundlagen des Verkehrsnachfragemodells. Als Einleitung für dieses Kapitel kann dabei ein tabellarischer Überblick über alle verwendeten Datengrundlagen dienen (siehe Kapitel 6). Hinsichtlich der verwendeten Daten sollte auch ersichtlich werden, wie alt die verwendeten Datensätze sind, welche Arbeitsschritte zur Aufbereitung notwendig waren und woher die Daten für Prognosezustände stammen.

Für den Personen- und Wirtschaftsverkehr sollten die folgenden Themenfelder dargestellt werden:

- Abbildung der Entscheidungsprozesse / Modellstufen (siehe Kapitel 5.1)  
Für jedes Teilmodell des Personen- und Wirtschaftsverkehrs sollten der gewählte Modellansatz, die ermittelten / kalibrierten Modellparameter sowie die gewählte Nutzenfunktion genannt, begründet und plausibilisiert werden. Ggf. muss auch auf Teilmodelle mit feineren Zeiträumen eingegangen werden.  
Sofern vorhanden sollte auf folgende Teilaspekte des Verkehrsnachfragemodells eingegangen werden:
  - Aktivitätenwahl und Verkehrserzeugung (siehe Kapitel 5.1.2)
  - Zielwahl (siehe Kapitel 5.1.3)

- Moduswahl (siehe Kapitel 5.1.4)
- Simultane Aktivitäten- und Moduswahl (siehe Kapitel 5.1.5)
- Simultane Ziel- und Moduswahl (siehe Kapitel 5.1.6)
- Abfahrtszeitwahl (siehe Kapitel 5.1.7)
- Umlegung, Routenwahl und Verbindungswahl (siehe Kapitel 5.1.8)
- Rückkopplungen zwischen den Modellstufen (siehe Kapitel 5.1.9)
- Einsatz von Korrekturverfahren (siehe Kapitel 5.1.10)
- Planungsraum und Untersuchungsraum (siehe Kapitel 5.2 und 6.1.4)  
Erläuterung der Zelleneinteilung sowie die Darstellung und Begründung der Anbindungsphilosophie.
- Abbildung Raum- und Siedlungsstruktur (siehe Kapitel 5.3 und 6.2)  
Erläuterung der Siedlungsstrukturdaten. Es ist darzustellen welche Variablen in die Nutzenfunktion einfließen.
- Abbildung des Verkehrsangebots (siehe Kapitel 5.4 und 6.1)  
Erläuterung des Verkehrsangebots. Es ist darzustellen welche Variablen in die Nutzenfunktion einfließen. Auf folgende Teilaspekte sollte dabei eingegangen werden:
  - Verkehrsmittel und Verkehrsmodi (siehe Kapitel 5.4.1)
  - Straßennetz (siehe Kapitel 5.4.2)
  - ÖV-Angebot (siehe Kapitel 5.4.3)
  - Nutzungsgebühren und Fahrtkosten (siehe Kapitel 5.4.4)
- Abbildung der Verkehrsnachfrage (siehe Kapitel 5.4.5 und 6.3)  
Erläuterung der Verkehrsnachfrage. Es ist darzustellen welche Variablen in die Nutzenfunktion einfließen. Auf folgende Teilaspekte sollte dabei eingegangen werden:
  - Personenverkehr (siehe Kapitel 5.5.1)
  - Wirtschaftsverkehr (siehe Kapitel 5.5.2)
  - Eventverkehr (siehe Kapitel 5.7)
- Externer Verkehr (siehe Kapitel 5.7 und 6.4.4)  
Erläuterung der Verkehrsnachfragedaten, die nicht vom Verkehrsnachfragemodell berechnet werden. Es ist darzustellen welche Variablen in die Nutzenfunktion einfließen.
- Prognose (siehe Kapitel 5.8)  
Sofern nicht bereits in den entsprechenden Unterkapiteln thematisiert, muss für alle in diesem Kapitel benannten Aspekte dargestellt werden, wie in Prognosezuständen verfahren wird und woher die zugehörigen Daten kommen.
- Berechnung der modusspezifischen Kenngrößenmatrizen  
Die Berechnung der modusspezifischen Kenngrößenmatrizen ist zu dokumentieren. Insbesondere

sollten die Behandlung des Zellbinnenverkehrs, die Behandlung von Anbindungen sowie die Parameter der Routensuche und -gewichtung thematisiert werden.

### **9.1.5 Zusammenfassung der Kalibrierung und Validierung**

Hinsichtlich des Prozesses der Kalibrierung und Validierung sollte im Modellhandbuch möglichst knapp dargestellt werden, inwieweit das Modell die gestellten Qualitätsanforderungen erfüllt und ob es für die vorgesehenen Einsatzzwecke geeignet ist. Für ausführlichere Informationen sollte auf den Kalibrierungs- und Validierungsbericht verwiesen werden.

### **9.1.6 Umgang und Handhabung des Modells**

Dieser Teil der Dokumentation befasst sich mit dem Umgang und der konkreten Handhabung des Modells in der Praxis. Folgende Punkte sind hierbei wichtig:

- Beschreibung der Ordnerstruktur und -inhalte
- Beschreibung der benutzerdefinierten Attribute für alle betroffenen Netzelemente
- Beschreibung der Matrizen
- Beschreibung der Filter
- Beschreibung der Skripte
- Beschreibung der Nachfrage (Nachfragedaten und Nachfragemodelle)
- Beschreibung des softwareseitigen Nachfrageberechnungsverfahrens
- Beschreibung der Hardware-, Speicher-, Rechenzeitressourcen:
  - Hardwarevoraussetzungen, um das Modell zu verwenden / zu berechnen
  - Speicherplatzbedarf (unter Angabe, was im Modell enthalten ist, z.B. Matrizen etc.)
  - Rechendauer für eine komplette Berechnung (unter Angabe der Hardwarespezifikation und des softwareseitigen Nachfrageberechnungsverfahrens)

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Datenhaltung und -archivierung. In der Dokumentation sollten folgende Punkte erläutert werden:

- Datenstruktur und -speicherort
- Dokumentation der Daten (inkl. Datenquellen und Metadaten)
- Sicherstellung der Lesbarkeit von Daten mit Open-Source-Software (nicht proprietär)
- Eigentumsrecht der Daten und des Modells

Hinsichtlich der Aktualisierung und der Versionierung des Modells und des Berichts sind folgende Fragen zu klären:

- Wird eine bestimmte Benennungs- oder Versionierungssystematik empfohlen?

- Wie ist der Umgang mit Fehlern, die erst im Verlauf der Anwendung (nach erfolgreicher Modellübergabe) entdeckt werden?
- Ist eine Aktualisierung vorgesehen und wenn ja, wann und von wem wird diese durchgeführt?
- Wird bei Weiterentwicklungen / Fehlerbehebungen der Bericht aktualisiert und wenn ja, durch wen?

### **9.1.7 Beschreibung von Modellzuständen**

In diesem Teil des Modellhandbuches sollten die verkehrlichen Situationen folgender Modellzustände beschrieben werden:

- Verkehrssituation des Analysejahres im Analysefall,
- Verkehrssituation des Prognosejahres im Bezugsfall,
- Verkehrssituation für vom Auftraggeber festgelegte Beispielplanfälle.

Neben einer allgemeinen Beschreibung der Verkehrssituation und der daraus abzuleitenden Erkenntnisse sollten ausgewählte Kenngrößen der Verkehrsnachfrage präsentiert werden. Speziell für Prognosezustände und Szenarien sollten alle gewählten Annahmen und / oder Maßnahmen offengelegt werden.

### **9.1.8 Ausblick auf potentielle Weiterentwicklungen**

Das Modellhandbuch sollte mit einem Ausblick abschließen, in dem zukünftige Weiterentwicklungen, Optimierungen oder Aktualisierungen hinsichtlich des Modellaufbaus, der verwendeten Eingangsdaten oder zukünftigen Entwicklungen genannt und priorisiert werden. Zusätzlich kann auch ein Zeitplan für solche zukünftigen Anpassungen vorgeschlagen werden.

### **9.1.9 Optional: Zusammenfassung für Modellierungslaien**

Diese Zusammenfassung sollte diese Informationen so darstellen, dass Nicht-Modellierer die Nützlichkeit und die Einschränkungen des Modells erkennen. Es sollten Informationen über folgende Bereiche gegeben werden:

- Hintergrund und Ziel der Modellierung,
- Beschreibung des Modellierungsprozesses,
- Beschreibung der Datengrundlage,
- Verlässlichkeit des Modells (Stärken und Schwächen des Modells) und
- geprüfte Einsatzbereiche und Einsatzbereiche, in denen das Modell keine validen Ergebnisse liefert.

## 9.2 Kalibrierungs- und Validierungsbericht

Die Validierung sollte alle Teilbereiche des Modellerstellungsprozesses (Aufbereitung der Eingangsdaten, Parameterbestimmung, Prüfung der Modellergebnisse und des Modellverhaltens) umfassen. Neben der der Prüfung des Modellergebnisses sollten auch die einzelnen Modellstufen geprüft werden, um eine Fehlerfortpflanzung über die Modellstufen hinweg zu minimieren. Wird ein Teilbereich nicht validiert, so ist dies mit einer Begründung in der Dokumentation zu vermerken. Diese Information ist für nachfolgende Modellnutzer wichtig, um einen Eindruck über die Validität des Modells zu erhalten.

Die Dokumentation sollte auch eine Auflistung aller Einflussvariablen der Nutzenfunktionen aufweisen und darstellen, inwieweit jede Einflussgröße das Modellergebnis beeinflusst. Der Einfluss der Variablen kann in Realitäts- und Sensitivitätstests simulativ quantifiziert werden. Die Ergebnisse dieser Tests sollten auch im Validierungsteil der Dokumentation dargestellt werden. Gegebenenfalls können somit auch Bandbreiten der Nutzenfunktionsparameter abgeleitet werden.

### 9.2.1 Allgemeine Informationen

Da der Kalibrierungs- und Validierungsbericht als eigenständiges Dokument angefertigt wird, sollte auch er zu Beginn allgemeine Informationen bereitstellen. Die konkreten Informationen sind identisch zu denen in Kapitel 9.1.1.

### 9.2.2 Qualitätssicherung des Verkehrsnachfragemodells

Hinsichtlich des Prozesses der Kalibrierung und Validierung sollte dargestellt werden, inwieweit das Modell die gestellten Qualitätsanforderungen erfüllt und ob es für die vorgesehenen Einsatzzwecke geeignet ist. Für den Personen- und Wirtschaftsverkehr sollten folgende Qualitätssicherungsschritte dargestellt werden:

- Verifizierung der Spezifikation und der Implementierung (siehe Kapitel 8.5)  
Dieser Teil der Qualitätsprüfung wird ggf. von einer unabhängigen, dritten Partei durchgeführt, muss aber trotzdem ausreichend dokumentiert werden, d.h. es muss mindestens eine Prozessbeschreibung und eine Darstellung des Prüfungsergebnisses stattfinden.
- Überprüfung der Eingangsdaten (siehe Kapitel 8.6)  
Ziel dieses Dokumentationsteils ist die Darstellung der Eingangsdatenqualität. So sollte für die Verkehrserhebungsdaten (siehe Kapitel 8.6.1), die Siedlungsstrukturdaten (siehe Kapitel 8.6.2) und die Verkehrsangebotsdaten (siehe Kapitel 8.6.3) auf folgende Punkte eingegangen werden:
  - Informationen zur Befragung / Erhebung / Datenbasis
  - ggf. Aussagen über die Datengrundlage, Grundgesamtheit und Stichprobenszusammensetzung
  - Darstellung von Auswertungsergebnissen
  - Informationen zur Qualität der Daten (Genauigkeit, Streuung, Aktualität)

- Kalibrierung und Validierung (siehe Kapitel 8.7 und 6.3)

Der Kalibrierungsprozess für jedes Teilmodell sollte grob skizziert werden. Die manuellen Eingriffe ins Modell (z.B. durch harte Randsummenbedingungen oder Matrixanpassungen) müssen unbedingt dokumentiert werden und mit entsprechenden Modellberechnungen ohne diese Eingriffe verglichen werden.

Die Dokumentation der Validierungsergebnisse sollte auf die verwendeten Referenzdaten eingehen, sowie deren Güte darstellen.

Die Dokumentation der Kalibrierung und Validierung sollte folgende Teilbereiche umfassen:

- Überprüfung der Parameter (Angabe der Parameter) (siehe Kapitel 8.7.2)
- Überprüfung der Modellergebnisse (siehe Kapitel 8.7.3) inkl. der Auswirkung von Korrekturverfahren
- Überprüfung des Modellverhaltens (siehe Kapitel 8.7.4)
- Abschließende Validierung der Modellergebnisse (siehe Kapitel 8.7.5)

- Abschätzung der Prognosegenauigkeit (siehe Kapitel 8.8)

Aussagen zur Prognosegenauigkeit aggregierter Modellwerte und von Verkehrsstärken. Zusätzlich kann erläutert werden, für welche Modellanwendungen die Modellergebnisse mehr oder weniger belastbar sind, z.B. bei besonderen Annahmen.

## 10 Hinweise zur Modellanwendung

Ergebnis der Modellerstellung ist ein vom Modellersteller kalibriertes und validiertes Verkehrsnachfragemodell, das nun vom Modellanwender für die Zwecke der Verkehrsplanung eingesetzt werden kann. Bei der Modellanwendung werden die Modellvariablen (siehe Kapitel 2.3.3) verändert und die daraus resultierenden Nachfragewirkungen berechnet. Ein Verkehrsnachfragemodell kann dabei auf zwei Arten eingesetzt werden:

### 1. Analyse der Wirkungen von vorgegebenen Planfällen:

Ein Planfall umfasst eine Menge von Entwicklungen und Maßnahmen. Die Modellanwender haben die Aufgabe, die vorgegebenen Änderungen in das Modell einzupflegen, die Modellrechnungen durchzuführen und gemeinsam mit den Modellnutzern die Ergebnisse zu analysieren und zu dokumentieren. Das Ergebnis ist ein Planfall mit Nachfragewirkungen, der dann im Planungsprozess weiter untersucht werden kann.

### 2. Entwicklung von Maßnahmen und Planfällen:

In diesem Fall wird das Verkehrsnachfragemodell für die rechnergestützte Planung eingesetzt. Bei der rechnergestützten Verkehrsplanung kommt es im Entwurfsprozess zu einer Aufgabenteilung zwischen den Planenden und dem Rechner. Während die Planenden, ausgehend von einer Startlösung (z.B. Planungsnullfall, der auch Annahmen über Entwicklungen umfasst), ihren Entwurf (Lösungsvorschlag) schrittweise verbessern, ermittelt der Rechner die Wirkungen der aktuellen Lösung. Dieser Prozess wird solange fortgeführt, bis die Lösung vorgegebene Ziele erreicht. Ergebnis ist eine Maßnahme oder eine Menge von Maßnahmen, die dann zu einem Planfall kombiniert werden können. Nach Abschluss des Entwurfsprozesses definiert die Lösung einen Planfall, der dann wie ein vorgegebener Planfall unter Punkt 1 behandelt werden kann.

Dieses Kapitel gibt Hinweise zur Analyse der Wirkungen von vorgegebenen Planfällen. Wesentliches Ziel ist eine Modellanwendung, die entsprechend der in Kapitel 8.2.2 und 8.2.3 formulierten Anforderungen reproduzierbar und für Dritte nachvollziehbar ist.

### 10.1 Festlegung der zu untersuchenden Maßnahmen

In diesem Schritt stimmen die Modellanwender mit den Modellnutzern ab, welche Maßnahmen untersucht werden sollen und welche Maßnahmen in einem Planfall kombiniert werden. Dabei sollen die Eigenschaften der Maßnahme möglichst genau beschrieben werden und bereits im Hinblick auf die Modellierbarkeit geprüft werden. Abbildung 10-1 zeigt ein Beispiel einer Maßnahmenbeschreibung. Hinweise zur Modellierung von weiteren Maßnahmen, finden sich in z.B. in Ritz (2019) [108].

Bei der Abbildung von Maßnahmen in einem Modell kann dabei zwischen zwei Arten von Maßnahmen unterschieden werden:

- Maßnahmen, die ohne weitere Annahmen abgebildet werden können:

Dazu gehören alle Maßnahmen, die sich ohne weitere Annahmen direkt durch geeignete Netzelemente im Modell abbilden lassen. Beispiele für solche Maßnahmen sind neue Verkehrswege, Änderungen am ÖV-Angebot oder Änderungen bei der Einwohnerzahl. Hier müssen die

Eigenschaften der Maßnahme (z.B. Kapazität, zulässige Geschwindigkeit, Führung des Verkehrswegs) möglichst genau festgelegt werden.

- Maßnahmen, die zusätzliche Annahmen erfordern:

Beispiele für solche Maßnahmen sind

- die Ausweisung eines Neubaugebiets (Welche Bevölkerungszusammensetzung wird erwartet?),
- die Ausweisung eines Einkaufszentrums (Wie viele Stellplätze wird es geben?),
- die Einführung eines Jobtickets oder eines Semestertickets (Welche Personengruppen bekommen das Angebot? Wie ändert sich der Preis für eine Fahrt?),
- der Bau einer städtischen Hauptradroute (Welche Geschwindigkeiten sind hier realisierbar? Reduzieren sich die Wartezeiten an Kreuzungen?) oder
- die Einführung eines Parkraummanagements (Welcher Anteil des Parkraums wird von Bewohnern genutzt? Welcher Anteil steht externen Nutzern zur Verfügung?).

Diese Annahmen müssen zusammen mit dem Modellnutzer festgelegt werden.

**Maßnahmenbezeichnung: Ortsumfahrung X-Stadt und Rückbau der Ortsdurchfahrt****Beschreibung der Maßnahme**

In X-Stadt wird die geplante Nordumfahrung als Straße mit einem RQ 11,5 und einer zulässigen Geschwindigkeit von 80 km / h umgesetzt. In der Ortsdurchfahrt wird die zulässige Geschwindigkeit auf 30 km / h reduziert.

**Wirkungszusammenhang / Wirkungsvermutung**

Die Ortsumfahrung reduziert den Durchgangsverkehr in der Ortsdurchfahrt und zieht in gewissem Umfang zusätzlichen Verkehr aus dem übergeordneten Straßennetz auf die neue Strecke.

**Abbildbarkeit im Verkehrsnachfragemodell**

- Die Ortsumfahrung und der Rückbau sind im Modell abbildbar.
- Es sind deutliche Änderungen bei der Routenwahl zu erwarten. Der Einfluss auf die Moduswahl wird klein sein.

**Modellierungsvorschlag**

- Die Ortsumfahrung wird als zusätzliche Strecke in das Netzmodell übernommen. Die Geschwindigkeit und die Kapazität auf der Ortsdurchfahrt werden reduziert.

**Ergebnis**

Es wird ein kompletter Modelllauf durchgeführt und die vereinbarten Kenngrößen (siehe Tabelle 4-4) werden ausgewiesen.

**Maßnahmenbezeichnung: Parkraumkonzept und Stellplatzverordnung im Oberzentrum und in den Mittelzentren****Beschreibung der Maßnahme**

In den Innenstadtbezirken des Oberzentrums und der Mittelzentren wird ein Parkraummanagement eingeführt oder das vorhandene Parkraummanagement erweitert. Die Gebühren werden auf 3 € / h erhöht. Außerdem werden in diesen Bereichen Stellplatzbeschränkungssatzungen umgesetzt.

**Wirkungszusammenhang / Wirkungsvermutung**

Der Parkraum wird für gebietsfremde Pkw-Fahrer bepreist. Bewohner parken gebührenfrei. Erhebungen im Planungsraum zeigen, dass tagsüber etwa 2/3 aller Stellplätze im Straßenraum von Bewohnern belegt sind. Die restlichen Pkw müssen zukünftig eine Gebühr entrichten, wodurch die Pkw-Nutzungskosten steigen. Gleichzeitig stehen tagsüber mehr freie Stellplätze zur Verfügung, die mehrfach genutzt werden können.

Die Stellplatzsatzungen führen dazu, dass Neubauten über weniger private Stellplätze pro Wohnung verfügen. Das kann zu einem allmählichen Rückgang des Motorisierungsgrades in den betroffenen Gebieten führen.

**Abbildbarkeit im Verkehrsnachfragemodell**

- Die Bepreisung des Parkens differenziert nach Nutzergruppen ist im Modell abbildbar. Zur Wirksamkeit der Stellplatzsatzungen müssen Annahmen getroffen werden.
- Es wird eine eher kleine Maßnahmenwirkung erwartet, sodass die Aussagegenauigkeit der Modellrechnung eingeschränkt ist.

**Modellierungsvorschlag**

- Die Verkehrszellenattribute Parkkosten und Bezahlparkeranteil werden in den Zellen mit Parkraummanagement angepasst.
- Die Zahl der Personen mit Pkw-Verfügbarkeit wird in den betroffenen Zellen geringfügig reduziert.

**Ergebnis**

Es wird ein kompletter Modelllauf durchgeführt und die vereinbarten Kenngrößen (siehe Tabelle 4-4) werden ausgewiesen. Die Ergebnisse werden mit maximalen Verlagerungspotenzialen plausibilisiert, die sich aus den im Straßenraum verfügbaren Stellplätzen ergeben.

**Maßnahmenbezeichnung: Höchstgeschwindigkeit 40 km / h innerorts****Beschreibung der Maßnahme**

Im Planungsraum wird auf allen innerörtlichen Straßen der Straßenklasse Bundes-, Landes- und Kreisstraße die zulässige Geschwindigkeit auf 40 km / h begrenzt. Auf allen anderen Innerortsstraßen gilt eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 30 km / h.

**Wirkungszusammenhang / Wirkungsvermutung**

Die Geschwindigkeitsreduzierung beeinflusst in gewissem Umfang die Routenwahl der Kfz, so dass die Nutzung innerörtlicher Straßen reduziert wird. Die höheren Reisezeiten beeinflussen die Verkehrsmittelwahl.

**Abbildbarkeit im Verkehrsnachfragemodell**

- Die Maßnahme ist vollständig im Modell abbildbar. Allerdings werden zulässige Geschwindigkeiten in der Praxis nicht immer eingehalten und die Zeitverluste an Knotenpunkten sind im Modell nur vereinfacht abgebildet.
- Es wird erwartet, dass die Maßnahme messbare Wirkungen haben wird. Es sind belastbare Aussagen zur Größenordnung der Änderung der Kfz-Kilometer im Stadtgebiet möglich.

**Modellierungsvorschlag**

Die zulässige Geschwindigkeit für Kfz wird auf den genannten Strecken auf 40 km / h bzw. auf 30 km / h reduziert.

**Ergebnis**

Es wird ein kompletter Modelllauf durchgeführt und die vereinbarten Kenngrößen (siehe Tabelle 4-4) werden ausgewiesen.

Abbildung 10-1: Beispielhafte Darstellung einer Maßnahmenbeschreibung.



### 10.3 Durchführung der Modellrechnungen

Modellrechnungen sollten automatisiert durchgeführt werden. Auf diese Weise lassen sich die Abläufe und Ergebnisse am besten reproduzieren. Abbildung 10-3 zeigt schematisiert den Aufbau eines Szenariomanagementsystem, das die Modellrechnungen für einen Planfall mit folgenden Schritten automatisiert durchführt:

- Erstellung eines Planfallmodells mit allen relevanten Eigenschaften des Planfalls Pn:
  - Einlesen Mastermodell
  - Einlesen der Netzattribute für Planfall Pn.
  - Einlesen der Verkehrszellenattribute für Planfall Pn.
  - Einlesen des Berechnungsablaufs für Planfall Pn.
- Durchführung der Nachfrageberechnung für das Planfallmodell Pn. Ergebnis ist ein Planfallmodell mit den Berechnungsergebnissen als Output.
- Durchführung standardisierter Auswertungen für Planfall Pn.

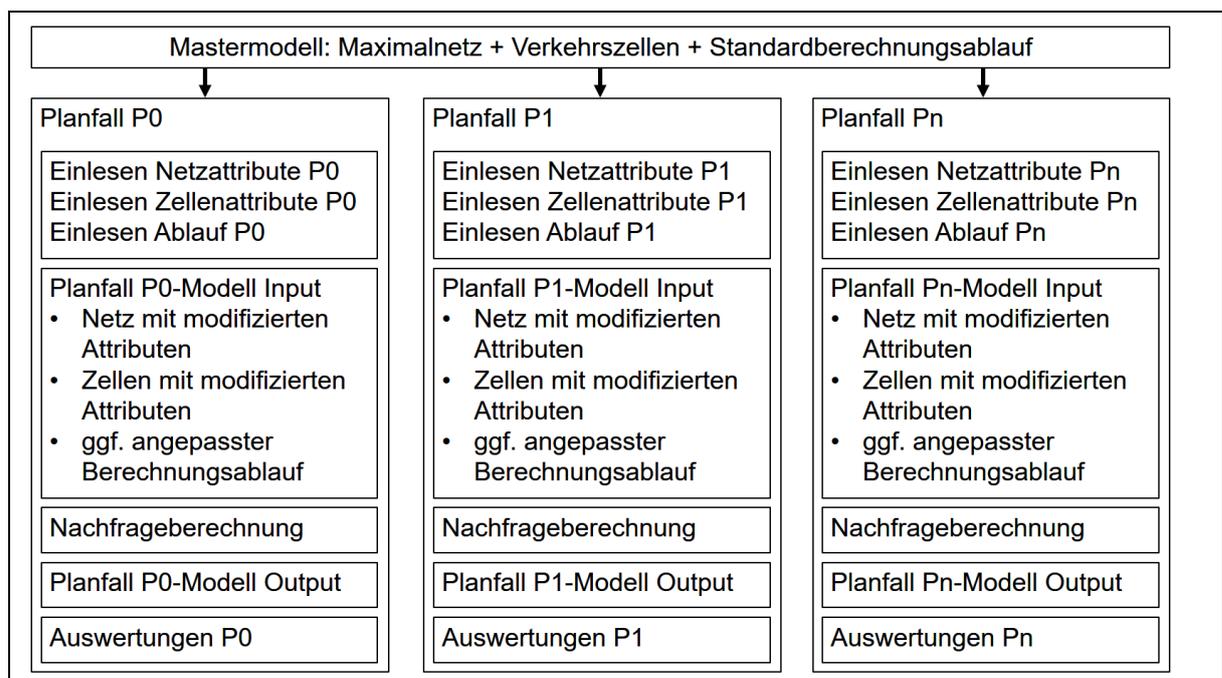


Abbildung 10-3: Aufbau eines Szenariomanagementsystems (bzw. Planfallmanagementsystems).

Maßnahmen, die Bestandteil eines Realitätstests (siehe Kapitel 8.7.4) sind, können in ein Szenariomanagementsystem integriert und können so auch zum Test des Szenariomanagementsystems genutzt werden.

### 10.4 Aufbereitung, Interpretation und Dokumentation der Ergebnisse

Ein Verkehrsnachfragemodell liefert eine große Menge von Ergebnissen (siehe Kapitel 4.4). Die Ergebnisse sollten entsprechend den Anforderungen der Modellnutzer für jeden Planfall einheitlich

aufbereitet werden. Diese Aufbereitung wird in der Regel mindestens folgende Auswertungen umfassen:

- Verkehrsaufkommen je Modus (Tabelle und Diagramm),
- Verkehrsleistung je Modus (Tabelle und Diagramm),
- Verkehrszeitaufwand je Modus (Tabelle und Diagramm),
- Verkehrsstärkekarten für vorgegebene Netzausschnitte (Karte),
- Verkehrsstärkedifferenzkarten (Differenzplot) für vorgegebene Netzausschnitte, die die Veränderungen gegenüber einem Vergleichsfall (Analysefall oder Bezugsfall) darstellen.

Tabelle 10-1 gibt eine Übersicht über weitere Kenngrößen, die bei einer Ergebnisaufbereitung dargestellt werden können. Die Kenngrößen einer Matrixauswertung und einer Umlegungsauswertung können nur dann miteinander verglichen werden, wenn der Zellbinnenverkehr bei der Matrixauswertung nicht berücksichtigt wird und wenn die Kenngrößenmatrix nach der Umlegung nochmal neu berechnet wird. Es muss dokumentiert werden, in welchem Rechenschritt die Kenngrößenmatrix berechnet wurde (siehe dazu Kapitel 5.4.5).

KenngroÙe	Inhaltliche Differenzierung	Räumliche Differenzierung			
		mit externem Verkehr		ohne externen Verkehr	
		Untersuchungsraum	Planungsraum	Untersuchungsraum	Planungsraum
Verkehrsaufkommen [Anzahl Wege]	• alle Personen			M	M
	• Wegezweck			M	M
	• Personengruppe × Wegezweck			M	M
	• Modus 1 ①			M	M
	• Modus 1 × Personengruppe			M	M
	• Modus 1 × Wegezweck			M	M
Verkehrsleistung [Personenkilometer] oder [Fahrzeugkilometer]	• alle Personen			M	M
	• Modus 1 ②			M	M
	• Modus 2	U	U	U ③	U ③
	• Personengruppe			M	M
	• Wegezweck			M	M
	• Straßenklasse	U	U	U ③	U ③
Verkehrszeitaufwand [Personenstunden] oder [Fahrzeugstunden]	• alle Personen			M	M
	• Modus 1			M	M
	• Modus 2	U	U	U ③	U ③
	• Personengruppe			M	M
	• Wegezweck			M	M
mittl. Reiseweite pro Weg [km]	• Wegezweck			M	M
mittl. Reisezeit pro Weg [min]	• Wegezweck			M	M
mittl. Wegezahl pro Person [Anzahl Wege]	• alle Personen			M	M
	• Personengruppe			M	M
mittl. Reiseweite pro Person [km]	• alle Personen			M	M
	• Personengruppe			M	M
mittl. Reiseweite pro Person [km]	• alle Personen			M	M
	• Personengruppe			M	M
<b>Legende</b>					
M KenngroÙe ist das Ergebnis einer Matrixauswertung. Es werden nur Wege mit Quelle und Ziel im jeweiligen Raum ausgewertet. Der Zellbinnenverkehr ist Bestandteil der KenngroÙe.					
U KenngroÙe ist das Ergebnis einer Umlegung und einer Aufsummierung der KenngroÙen über alle Netzelemente (Strecken, Abbieger, Anbindung) im jeweiligen Raum. Der Zellbinnenverkehr ist nicht Bestandteil der KenngroÙe					
Die KenngroÙen einer Matrixauswertung M und einer Umlegungsauswertung U können nur dann verglichen werden, wenn der Zellbinnenverkehr nicht berücksichtigt wird und wenn die KenngroÙenmatrix nach der Umlegung nochmal neu berechnet wird.					
① Aus diesen KenngroÙen kann der wegebezogene Modal-Split berechnet werden.					
② Aus diesen KenngroÙen kann der verkehrsleistungsbezogene Modal-Split berechnet werden.					
③ Diese Auswertung ist nur möglich, wenn der externe Verkehr als eigene Nachfragegruppe umgelegt wird.					
Ausprägungen des Modus					
• Modus 1: Fuß, Rad, ÖV, Pkw-Selbstfahrer und Pkw-Mitfahrer: Für diese Auswertungen ist keine Umlegung erforderlich; ausgewertet werden alle Wege mit Quelle und Ziel im jeweiligen Raum.					
• Modus 2: ÖV, Pkw-Selbstfahrer, Lkw: Für diese Auswertungen ist eine Umlegung erforderlich, um die Verkehrsleistung und den Verkehrszeitaufwand pro Raum zu ermitteln.					

Tabelle 10-1: Ergebnisse eines Verkehrsnachfragemodells.

Bei der Darstellung der Modellergebnisse sollten im Sinne der Transparenz möglichst alle Kenngrößen ausgewiesen werden. Aus Sicht der Verständlichkeit wird eine Begrenzung auf die wesentlichen Ergebnisse sinnvoll sein. Folgende Hinweise sollten bei der Ergebnisdarstellung beachtet werden:

- Runden der Ergebniswerte:

Die Modellergebnisse werden genau berechnet. Bei der Aufbereitung werden die Ergebniswerte dann angemessen gerundet. Modal-Split-Werte auf ganze Prozentpunkte, tägliche Verkehrsstärken auf 500 oder 1.000 Personen oder Fahrzeuge, mittlere Reiseweiten auf 0,1 Kilometer.

- Auswahl der Verkehrsstärken:

In Verkehrsstärkekarten werden ausgewählte, gerundete Verkehrsstärken dargestellt. Wenn sich die Verkehrsstärken zwischen benachbarten Strecken nicht ändern, muss der Wert nicht dargestellt werden.

- Darstellung von modusbezogenen Kenngrößen der Nachfrage:

In der Praxis sind wegebezogene Modal-Split-Werte eine häufig genutzte Art, um einen Zustand zu beschreiben. Diese Darstellungsart ist jedoch nicht geeignet, um Änderungen darzustellen. Durch die Normierung auf 100% und das Weglassen der Weglänge sind viele Änderungen (z.B. Zunahmen des Verkehrsaufkommens und der Verkehrsleistung) nicht erkennbar. Es sollten deshalb immer die Personenkilometer je Modus als absolute Werte oder normiert auf die Personenkilometer des Vergleichsfalls ausgewiesen werden.

Tabelle 10-2 zeigt Ergebnisse fiktiver Modellrechnungen für zwei Zustände. Zustand 1 beschreibt den Analysefall eines Untersuchungsraums mit 500.000 Einwohnern. Im Prognosezustand 2 steigt die Zahl der Einwohner auf 600.000. Außerdem erhöht sich der Anteil der Wege mit dem Rad, während gleichzeitig der Anteil der Wege mit dem Pkw sinkt. Allerdings erhöht sich die Wegelänge im Pkw-Verkehr und der Besetzungsgrad bzw. der Anteil der Pkw-Mitfahrer nimmt ab. In Abbildung 10-4 werden die Änderungen im Verkehrsaufkommen und in der Verkehrsleistung für die beiden Zustände mit verschiedenen Darstellungsarten visualisiert. Je nach Darstellungsart ergeben sich für dieselben Zustände unterschiedliche Ergebnisse. Der Pkw-Verkehr kann um 5% zurückgehen (bezogen auf Prozentpunkte beim wegebezogenen Modal-Split, der nicht zwischen Selbstfahrern und Mitfahrern unterscheidet; Darstellung a) in Abbildung 10-4) oder um 32% steigen (bezogen auf die Pkw-Fahrzeugkilometer im Netz; Darstellung e) bzw. g) in Abbildung 10-4)). Für die Verkehrsplanung ist nur die absolute Verkehrsleistung von Bedeutung.

- Darstellung von relativen Änderungen für einen Modus:

Relative Änderungen beschreiben die Zu- oder Abnahme des Verkehrsaufkommens oder der Verkehrsleistung eines Modus gegenüber einem Vergleichsfall. So lässt sich beispielsweise erläutern, dass die Wirkungen einer Verlagerung vom Pkw zum ÖV im Straßennetz weniger spürbar sind als im ÖV-Netz, z.B. können 10% weniger Pkw-Kilometer zu 50% mehr Personenkilometer im ÖV führen. Die Ausweisung relativer Änderungen können aber schwer verständlich sein, da die Summe der prozentualen Änderungen über alle Modi nicht der Änderung der gesamten Verkehrsleistung entspricht. Diese Art der Darstellung kann immer nur eine Ergänzung sein.

		Verkehrsaufkommen [Personenwege]			Weglänge [km]	Verkehrsleistung [Personenkilometer]		
		absolut	relativ	absolut (normiert auf die Summe der Personen- wege im Zustand 1)		absolut	relativ	absolut (normiert auf die Summe der Personen- kilometer im Zustand 1)
Zustand 1	Fuß	375.000	25,0%	$\frac{375.000 \cdot 100}{1.500.000}$ = 25	1,0	375.000	2,5%	$\frac{375.000 \cdot 100}{15.000.000}$ = 2,5
	Rad	75.000	5,0%	5	3,0	225.000	1,5%	1,5
	ÖV	375.000	25,0%	25	15,0	5.625.000	37,5%	37,5
	Pkw-Mitfahrer	150.000	10,0%	10	13,0	1.950.000	13,0%	13,0
	Pkw-Selbstfahrer	525.000	35,0%	35	13,0	6.825.000	45,5%	45,5
	Summe	1.500.000	100,0%	100	10,0	15.000.000	100,0%	100,0
	Besetzungsgrad Pkw	1,29				1,29		
	Zustand 2							
Zustand 2	Fuß	450.000	25,0%	$\frac{450.000 \cdot 100}{1.500.000}$ = 30	1,0	450.000	2,4%	$\frac{450.000 \cdot 100}{15.000.000}$ = 3,0
	Rad	180.000	10,0%	12	3,0	540.000	2,9%	3,6
	ÖV	450.000	25,0%	30	15,0	6.750.000	36,4%	45,0
	Pkw-Mitfahrer	120.000	6,7%	8	15,0	1.800.000	9,7%	12,0
	Pkw-Selbstfahrer	600.000	33,3%	40	15,0	9.000.000	48,5%	60,0
	Summe	1.800.000	100,0%	120	10,3	18.540.000	100,0%	123,6
	Besetzungsgrad Pkw	1,20				1,20		
	<p><b>Zustand 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 500.000 Einwohner · 3 Wege / Einwohner = 1.500.000 Wege</li> <li>• Mittlere Weglänge Pkw 13,0 km</li> <li>• Anteil Rad 5%</li> <li>• Anteil Pkw 45%</li> </ul> <p><b>Zustand 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 600.000 Einwohner · 3 Wege / Einwohner = 1.800.000 Wege</li> <li>• Mittlere Weglänge Pkw 15,0 km</li> <li>• Anteil Rad 10%</li> <li>• Anteil Pkw 40%</li> </ul>							

Tabelle 10-2: Fiktive Beispielergebnisse einer Modellrechnung für zwei Zustände.

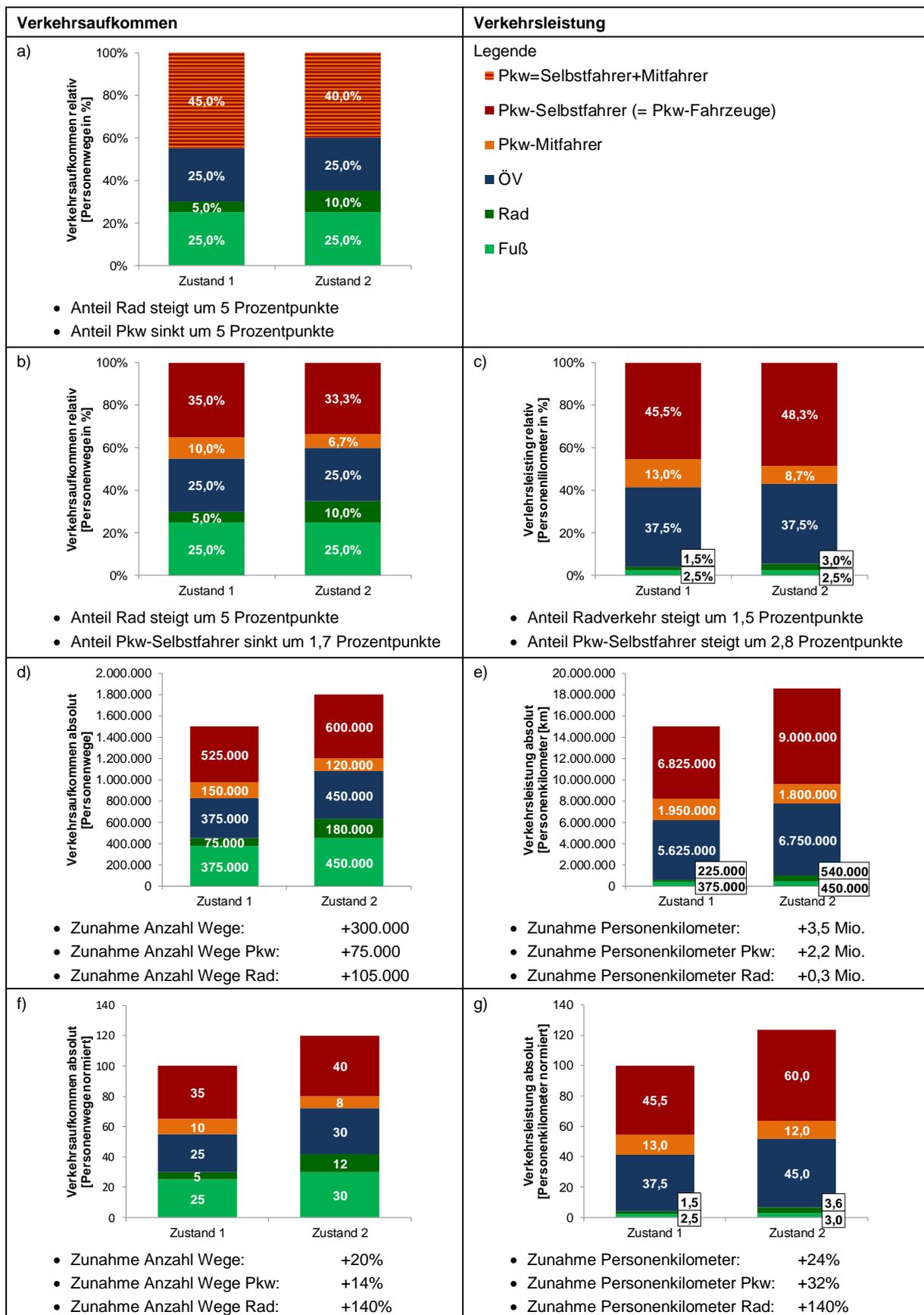


Abbildung 10-4: Darstellungsarten von Kenngrößen der Verkehrsnachfrage für zwei Zustände (siehe Tabelle 10-2). Für jede Darstellungsart werden die Änderungen für die Modi Pkw und Rad angegeben. Je nach Darstellungsart ergeben sich für dieselben Zustände unterschiedliche Ergebnisse: Von einem Rückgang im Pkw-Verkehr um 5% (a) bis zu einer Zunahme um 32% (e bzw. g).

Die Ergebnisse einer Modellrechnung sollten gemeinsam von Modellanwender und Modellnutzer diskutiert und interpretiert werden. Bei unplausiblen oder unerwarteten Ergebnissen sollten die Ursachen analysiert werden. In welchen Modellstufen ändern sich die Ergebnisse gegenüber dem Vergleichsfall? Für welche Relationen haben sich die Kenngrößen der Angebotsqualität (Reisezeit, etc.) verändert und ist diese Änderung plausibel? Kann es einen Fehler bei den Daten des Planfalls oder bei der Abbildung der Maßnahmen geben?

Da jedes Modell eine Abstraktion der Realität darstellt, sollte die Ergebnisdarstellung Hinweise zur Interpretation der Ergebnisse liefern, die auch auf Einschränkungen des Modells hinweisen. Die Hinweise können z.B. folgende Aussagen enthalten:

- Die Verkehrsstärken sind nur auf Hauptstraßen oder auf ausgewählten Straßenklassen aussagekräftig, da Zellbinnenverkehre nicht umgelegt werden und Verkehr nur an wenigen Punkten in das Netz eingespeist wird.
- Das ÖV-Umlegungsverfahren berücksichtigt keine Kapazitätsbegrenzungen. Das kann die Moduswahl zugunsten des ÖV beeinflussen, wenn es regelmäßige Überlastungen gibt.
- Makroskopische Verkehrsnachfragemodelle modellieren das durchschnittliche Verhalten der Bevölkerung. In der Realität treten aber innerhalb einer Personengruppe Schwankungen auf. Deshalb wird es Abweichungen zwischen Modell und Realität geben.

Alle Modellanwendungen müssen auf eine möglichst einheitliche Weise dokumentiert werden. Das umfasst

- eine Beschreibung des Planfalls,
- eine Beschreibung der Modellierung und
- eine Darstellung der Ergebnisse.

## 10.5 Nutzung der Modellergebnisse für die Verkehrsplanung

Eine zielorientierte Verkehrsplanung quantifiziert die Wirkungen geplanter Maßnahmen mit Kennwerten geeigneter Kenngrößen und vergleicht die Wirkungen mit vorgegebenen Zielen. Dabei können die Kennwerte eines geplanten Zustands mit zwei Ansätzen bewertet werden;

- Absolute Bewertung:  
Eine absolute Bewertung vergleicht die Kennwerte eines Zustands mit vorgegebenen Anspruchsniveaus. Beispiele für eine absolute Bewertung:
  - Die mittlere Reiseweite im Pkw soll im Untersuchungsraum bezogen auf die Einwohner weniger als  $x$  km betragen.
  - $x$  % der ÖV-Fahrgäste sollen ihr Ziel mit maximal einem Umstieg erreichen.
  - Mindestens  $x$  % der Wege sollen mit dem Modus  $m$  zurückgelegt werden.
  - Bewertung nach den Stufen der Angebotsqualität, die in den RIN [51] vorgegeben sind.

- Relative Bewertung:

Eine relative Bewertung vergleicht die Kennwerte eines Zustands mit den Kennwerten eines Vergleichsfalls (Analysefall oder Bezugsfall). Beispiele für eine relative Bewertung:

- Absolute oder relative Änderung des Verkehrsaufkommens (Personenwege) je Modus im Untersuchungsraum.
- Absolute oder relative Änderung der Verkehrsleistung (Personenkilometer) je Modus im Untersuchungsraum.
- Absolute oder relative Änderung der Verkehrsstärke auf maßnahmenrelevanten Netzelementen.

Ein Verkehrsnachfragemodell liefert Kenngrößen, die für einen Verkehrsplanungsprozess (siehe „Empfehlungen für Verkehrsplanungsprozesse“ (EVP) [56]) benötigt werden. Diese Kenngrößen

- können direkt für die Bewertung eines Zustands genutzt werden,
- können als Eingangsdaten für nachgeschaltete Wirkungsmodelle genutzt werden, die Wirkungen ermitteln, die sich als direkte Folge von Ortsveränderungen ergeben (z.B. Emissionen),
- können als Eingangsdaten für nachgeschaltete Bewertungsmodelle genutzt werden, die den Nutzen eines Zustands bewerten (z.B. Nutzen-Kosten-Analyse).

## 11 Zusammenfassung und Fazit

### 11.1 Zusammenfassung

#### Ziel des Projekts

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts sollen Nutzern, Anwendern und Erstellern von Verkehrsnachfragemodellen bei der Erstellung und Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen unterstützen. Sie sollen so dazu beitragen, dass Planende im Verkehrsplanungsprozess auf die Ergebnisse hochwertiger Verkehrsnachfragemodelle zurückgreifen können.

#### Inhalte des Projekts

Der Aufbau des Projektberichts orientiert sich am Ablauf einer Modellerstellung und der sich anschließenden Modellanwendung. Der Ablauf der erforderlichen Arbeitsschritte ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Der Projektbericht

- gibt einen Überblick über Verkehrsnachfragemodelle für den Personen- und Wirtschaftsverkehr,
- fasst den Stand der Forschung und Praxis bei der Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen zusammen,
- beschreibt Einsatzbereiche von Verkehrsnachfragemodellen,
- gibt Hinweise und Empfehlungen für die Erstellung von Verkehrsnachfragemodellen,
- dokumentiert geeignete Datenquellen für die Modellerstellung,
- formuliert Anforderungen an die Modellierungssoftware,
- schlägt Qualitätsmaße für den Nachweis der Modellqualität vor,
- formuliert Anforderungen an die Dokumentation von Verkehrsnachfragemodellen,
- gibt Hinweise zur Modellanwendung.

Als Projektergebnisse werden neben dem Bericht mehrere Dateien zur Verfügung gestellt, die den Prozess der Modellerstellung unterstützen sollen. Sie umfassen drei Checklisten, zwei Dokumentationsvorlagen, eine Vorlage für eine Leistungsbeschreibung und zwei Microsoft Excel-Tools. Das eine Tool enthält die Formeln für die Qualitätsmaße, das zweite Tool ermöglicht es anwendungsspezifischen Spezifikationen zu erzeugen.

#### Hinweise und Empfehlungen für die Erstellung von Verkehrsnachfragemodellen

Ein Schwerpunkt des Berichts sind die Hinweise und Empfehlungen für die Erstellung von Verkehrsnachfragemodellen. Für 20 Themen der Verkehrsnachfragemodellierung (Entscheidungsmodelle, Verkehrserzeugungsmodelle, Zielwahlmodelle, Moduswahlmodelle, simultane Aktivitäten- und Moduswahlmodelle, simultane Ziel- und Moduswahlmodelle, Abfahrtszeitwahlmodelle, Umlegungsmodelle für den IV und den ÖV, Rückkopplungen zwischen den Modellstufen, Einsatz von Korrekturverfahren, Festlegung Planungsraum und Untersuchungsraum, Abbildung von Raum- und

Siedlungsstruktur, Abbildung des Verkehrsangebots, Abbildung der Verkehrsnachfrage im Personenverkehr, im Wirtschaftsverkehr und im Eventverkehr, Berücksichtigung von Sharingangeboten und externem Verkehr, Erstellung von Prognosen) liegt nun eine Sammlung von Hinweisen und Empfehlungen vor, die den Stand der Erfahrungen in der Verkehrsnachfragemodellierung wiedergibt. Die Sammlung basiert auf den Erfahrungen von rund 20 Personen in Deutschland und der Schweiz, die regelmäßig Modelle erstellen oder mit Modellen arbeiten. Die Inhalte adressieren konkrete Fragestellungen der Praxis, die so in Lehrbüchern nicht behandelt werden. Die Sammlung kann Modellierern sowohl bei der Erstellung von Modellspezifikationen als auch bei der Implementierung von Modellen als eine Art praxisnahes Nachschlagewerk dienen.

### **Anforderungen an die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen**

Ein zweiter Schwerpunkt des Berichts liegt in der Formulierung von Anforderungen an die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen. Anders als bei den Hinweisen und Empfehlungen für die Erstellung von Verkehrsnachfragemodellen, gibt es zur Qualitätssicherung eine Reihe von Forschungsarbeiten und Richtlinien, die in Kapitel 3.2 und 3.3 beschrieben sind. Für die Beschreibung des Qualitätssicherungsprozesses (Abbildung 8-1) werden in Anlehnung an WebTAG (UK, [31 bis 38]) und das Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual (USA, [26]) einheitliche Bezeichnungen (Verifizierung, Überprüfung, Kalibrierung, Validierung) definiert und andere ähnliche Begriffe (z.B. Eichung, Plausibilisierung) bewusst nicht verwendet.

Für die Überprüfung der Modellergebnisse wird mit dem *SQV* ein neues Gütemaß für Einzelwerte (z.B. Verkehrsstärken) vorgeschlagen, das auf einem vorhandenen Gütemaß (*GEH*) aufbaut und dieses Maß weiterentwickelt. Für die Beurteilungen von Reiseweite- und Reisezeitverteilungen wird das Coincidence Ratio (*CR*) empfohlen und Vorgaben für die Wahl der Bezugsgröße (moduspezifische oder modusübergreifende Reiseweite und Reisezeit) und Klassierung (Zahl der Klassen und Klassenbreite) gemacht. Mit diesen Gütemaßen sollen dann die Übereinstimmung berechneter und beobachteter Werte für ausgewählte Kenngrößen der Verkehrsnachfrage (Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung, Verkehrszeitaufwand, Verkehrsstärke) beurteilt werden. Für die Beurteilung der Qualität wird nicht ein Mindestwert vorgegeben, sondern Qualitätsbereiche, die von sehr großer Übereinstimmung bis unzureichender Übereinstimmung reichen.

Zusätzlich zur Überprüfung der Modellergebnisse soll auch das Modellverhalten überprüft werden. Hierfür wird aus WebTAG und Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual das Konzept der Realitätstests und Sensitivitätstests übernommen. Realitätstests prüfen die Prognosefähigkeit eines Modells, in dem die Variablen des Modells verändert werden. Sensitivitätstests prüfen den Einfluss der Modellparameter auf das Ergebnis. So soll sichergestellt werden, dass ein Modell maßnahmenempfindlich ist und die Wirkungen von Entwicklungen und geplanten Maßnahmen möglichst gut abschätzt.

Die vorgeschlagene Vorgehensweise bei der Qualitätssicherung entspricht nur zum Teil der derzeitigen Praxis und ist aufwändiger als heute übliche Modellprüfungen. Die vorgeschlagene Vorgehensweise bietet aber den Vorteil, dass die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen einheitlich beurteilt wird und verschiedene Modelle so besser miteinander verglichen werden können. Derzeit besteht Unsicherheit

darüber, welche Qualitätswerte tatsächlich erreicht und damit in Ausschreibungen gefordert werden können. Wenn zukünftig einheitliche Gütemaße als Qualitätskenngrößen vorgegeben und in Modellberichten veröffentlicht werden, kann die bestehende Unsicherheit reduziert werden.

## 11.2 Organisatorische Aspekte einer Modellerstellung

Der vorliegende Projektbericht behandelt Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle und leitet daraus Empfehlungen für die Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells ab. Für die erfolgreiche Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells sind neben den fachlichen Aspekten auch organisatorische Aspekte von Bedeutung, die nicht oder nur indirekt Gegenstand des Forschungsprojekts sind.

### Aufgaben der Projektbeteiligten

Damit ein Verkehrsnachfragemodell die Erwartungen der Modellnutzer erfüllt, sind alle Beteiligten vom Softwarehersteller über den Modellersteller bis zum Nutzer der Modellergebnisse gefordert. Das führt zu den im Folgenden beschriebenen Aufgaben. Für die mit einem \* markierten Aufgaben liefert der vorliegende Projektbericht eine Vorgehensweise.

Die Nutzer des Verkehrsnachfragemodells

- sind in der Regel die Verkehrsingenieure und Politiker in Kommunen, Kreisen oder Regionen,
- vergeben die Erstellung und die Fortschreibung des Verkehrsnachfragemodells intern oder extern,
- müssen die Einsatzbereiche des Modells z.B. in der Ausschreibung festlegen und angemessene Qualitätsnachweise fordern\*,
- sollten zusätzliche Messwerte für die Validierung erheben bzw. erheben lassen,
- sollten das Verkehrsnachfragemodell abnehmen\* und dafür Zeit einplanen,
- können externe Reviewer mit der Überprüfung des Modells beauftragen.

Die Modellersteller

- sind in der Regel Angestellte einer Kommune, einer Region oder eines Ingenieurbüros,
- sind für die Modellerstellung einschließlich der Kalibrierung und Validierung verantwortlich\*,
- müssen die Modellerstellung und die Modellqualität dokumentieren\*,
- müssen die Aussagegenauigkeit des Modells quantifizieren\* und den Nutzer auf Grenzen der Modellierung hinweisen,
- sollten Kunden auf die Notwendigkeit guter Inputdaten hinweisen,
- sollten sich regelmäßig fortbilden.

Die Softwarehersteller

- müssen Sorge tragen, dass die Software die Wirkungszusammenhänge formal und numerisch richtig berechnet,

- müssen durch eine bedienungsfreundliche Oberfläche und geeignete Daten- und Programmierschnittstellen dem Modellierer eine effiziente Modellerstellung ermöglichen,
- sollten Methoden zur Kalibrierung und Validierung in die Software integrieren,
- müssen die Verfahren gut dokumentieren.

Forschungsgesellschaften und Forschungseinrichtungen:

- sollten Empfehlungen zur Verkehrsnachfragemodellierung entwickeln\*,
- sollten Aussagen machen, was eine angemessene Modellgenauigkeit ist\*,
- können die Softwaresysteme testen,
- sind für die Ausbildung der Modellierer verantwortlich.

### **Bedeutung eines Projektmanagements**

Die Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells findet im Rahmen eines Projektes statt, dessen Komplexität u.a. mit dem Umfang des Modells und der Zahl der Personen, die sich für das Projekt interessieren, steigt. Ab einer gewissen Komplexität wird das Projektmanagement zu einem wesentlichen Erfolgsfaktor. Ein Projektmanagement kann dabei folgende Komponenten umfassen:

- Risikoanalyse:  
Darstellung von Risiken für jedes Arbeitspaket von Seiten des Auftraggebers (z.B. Verfügbarkeit von Inputdaten) und des Auftragnehmers (z.B. unbekannte Aufwände für die Erstellung eines Netzmodells). Falls möglich, Entwicklung von Strategien, wie den Risiken zu begegnen ist.
- Kommunikation:  
Benennung von Kontaktpersonen bei allen beteiligten Institutionen. Vereinbarung einer regelmäßigen Kommunikation zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer z.B. über einen monatlichen Jour Fixe oder wöchentliche Projekttagbücher.
- Zeitmanagement:  
Vereinbarung von Meilensteinterminen, zu denen Projektzwischenstände abgenommen werden. Kontrolle der Zeitpläne und Dokumentation von Verzögerungsursachen. Welche Projektbeteiligten sind für die Verzögerung verantwortlich und welche Auswirkung hat die Verzögerung auf das Projekt?
- Änderungsmanagement:  
Dokumentation nachträglicher Änderungen. Das können zusätzliche Anforderungen des Auftraggebers oder Änderungen der Modellierungsmethode durch den Auftragnehmer sein.
- Fachliches Projektcontrolling:  
Fachliche Begleitung des Auftraggebers durch eine dritte Partei.
- Projektsteuerung:  
Benennung einer Person, die den Projektablauf organisiert und kontrolliert.
- Kommunikationsstrategien mit Interessenten am Projektvorhaben (Stakeholdermanagement).

### 11.3 Fazit

Eine gute Verkehrsplanung braucht gute Verkehrsnachfragemodelle. Hinweise, was ein gutes Verkehrsnachfragemodell ist und wie es erstellt werden sollte, liefert der vorliegende Bericht. Für ein derartiges Verkehrsnachfragemodell sollten aber noch weitere Voraussetzungen erfüllt sein:

- Eine detaillierte Modellspezifikation, die alle Anforderungen der Modellnutzer enthält und darstellt, wie das Modell aufgebaut werden soll. *Erst spezifizieren, dann modellieren!*
- Eine umfassende Datengrundlage, die alle relevanten Eingangsdaten (Verkehrserhebungsdaten, Siedlungsstrukturdaten und Verkehrsangebotsdaten) umfasst. *Mehr messen, besser modellieren!*
- Ein erfahrendes Modellierungsteam. Für die Erstellung eines komplexen Verkehrsnachfragemodells wird eine Person mit folgenden Eigenschaften benötigt: Die Person kann effizient mit Daten umgehen und verfügt über Programmierkenntnisse. Die Person kennt Methoden der Statistik und kann Modellparameter schätzen. Die Person weiß, wie ein Verkehrsnachfragemodell funktioniert und kennt alle wesentlichen Empfehlungen, die in diesem Bericht beschrieben sind. Die Person hat schon Verkehrsnachfragemodelle aufgebaut. Diese Person gibt es vermutlich nicht. Deshalb wird ein Verkehrsnachfragemodell meist von mehreren Personen als Teamarbeit erstellt. *Keiner kann alles!*
- Ausreichend Zeit für die Projektbearbeitung gewähren. Auftraggeber brauchen oft ein Jahr, um eine Ausschreibung zu erstellen und durchzuführen. Und dann brauchen sie möglichst schnell Modellergebnisse. Natürlich könnten drei erfahrene Personen, die ein Jahr keine andere Aufgabe haben, in einem Jahr ein gutes Modell erstellen. Ein Auftraggeber kann aber nicht erwarten, dass ein Auftragnehmer sofort nach dem Zuschlag ausreichend freie Arbeitskräfte für die Modellerstellung hat, die nur für das Projekt zur Verfügung stehen. Die reine Arbeitszeit für eine Modellerstellung wird fast immer mindestens zwei Personenjahre betragen, bei großen Modellen auch deutlich mehr. Und auch der Auftraggeber braucht Zeit für die Datenbeschaffung und die Modellabnahme. Dafür sollte ausreichend Zeit eingeplant werden. *Arbeit braucht Zeit – gute Arbeit braucht mehr Zeit!*
- Ausreichend Zeit für die Projektbearbeitung einplanen. Auf der Seite der Auftragnehmer bearbeiten Modellierer häufig mehr als ein Projekt. Dazu kommen immer wieder mehr oder weniger unerwartete Anwendungs- und Wartungsaufgaben für bereits ausgelieferte Modelle. Diese Mehrfachbelastung führt immer wieder dazu, dass sich Modellierer nicht längere Zeit an einem Stück mit einer Modellierungsaufgabe beschäftigen können. Das ist nachvollziehbar, aber trotzdem nicht effizient. Potenzielle Auftragnehmer müssen ausreichend Pufferzeiten einplanen. *Zeit hat man nicht – Zeit muss man sich nehmen!*
- Einen entspannten Auftraggeber und einen entspannten Auftragnehmer. Ein Auftraggeber steht unter Druck. Er hat viel Geld für ein Verkehrsnachfragemodell im Haushalt beantragt und muss zeigen, dass das Geld gut investiert ist. Ein Auftragnehmer steht ebenfalls unter Druck. Er hat Kosten und Zeit kalkuliert und will ein gutes Ergebnis zeitgerecht abliefern, um den Auftraggeber zufrieden zu stellen und um das Projekt mit einem Plus abzuschließen. Und dann passiert immer etwas Unerwartetes, an das weder Auftraggeber noch Auftragnehmer gedacht haben. Ein Projekt macht mehr Spaß, wenn die Projektbeteiligten auch dann noch wohlwollend miteinander umgehen und

gemeinsam eine Lösung suchen – vielleicht mit Unterstützung eines Dritten. *Der Ton macht die Musik. Es kommt nicht nur darauf an, was man sagt, sondern wie man es sagt!*

- Fachliche Begleitung durch Dritte: Wird ein Modell allein dadurch besser, weil der Modellersteller weiß, dass das Modell durch Dritte geprüft wird? Wenn nicht nur das fertige Modell durch einen Dritten abgenommen wird, sondern auch Modellzwischenstufen und die zugehörige Modelldokumentation, können eventuelle Unzulänglichkeiten oder Missverständnisse früher erkannt und leichter behoben werden. Je nach Sichtweise gilt dann: *Vier Augen sehen mehr als zwei!* Oder *Vertrauen ist gut – Kontrolle ist besser!*

## 12 Verzeichnisse

### 12.1 Literaturverzeichnis

- [1] *Andres, P.; Spiwoks, M.*: Prognosegütemaße. State of the Art der statistischen Ex-post-Beurteilung von Prognosen. Sofia-Studien zur Institutionenanalyse. Nr. 00-1. ISBN: 9783933795229. Sofia, Darmstadt 2000.  
<http://www.sofia-darmstadt.de/fileadmin/Dokumente/Studien/2000/00-1.pdf>, abgerufen am 20.12.2017
- [2] *Australian Transport Council* (Hrsg.): National guidelines for transport system management in Australia 2006. 2nd ed. ISBN: 9780980288049, Barton, A.C.T. 2006.  
[http://transportinfrastructurecouncil.gov.au/publications/files/National\\_Guidelines\\_Volume\\_4.pdf](http://transportinfrastructurecouncil.gov.au/publications/files/National_Guidelines_Volume_4.pdf), abgerufen am 17.12.2015
- [3] *Axhausen, K. W.; Ehreke, I.; Glemser, A.; Hess, S.; Jödden, C.; Nagel, K.; Sauer, A.; Weis, C.*: Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung. Entwurf Schlussbericht, FE-Projekt-Nr. 96.996/2011 2014.  
[https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2015-zeitkosten-pv.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2015-zeitkosten-pv.pdf?__blob=publicationFile), abgerufen am 25.07.2016
- [4] *Axhausen, K. W.; Gärling, T.*: Activity-based approaches to travel analysis: conceptual frameworks, models, and research problems: *Transport Reviews*. Volume 12, Issue 4 1992, S. 323–341.  
[https://www.researchgate.net/publication/248987259\\_Activity-based\\_approaches\\_to\\_travel\\_analysis\\_conceptual\\_frameworks\\_models\\_and\\_research\\_problems](https://www.researchgate.net/publication/248987259_Activity-based_approaches_to_travel_analysis_conceptual_frameworks_models_and_research_problems), abgerufen am 27.04.2018
- [5] *Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.*: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 13., überarbeitete Auflage. ISBN: 978-3642164903. Springer, Berlin, Dordrecht, London, New York 2011
- [6] *Balmer, M.; Meister, K.; Rieser, M.; Axhausen, K. W.*: Agent-based simulation of travel demand: Structure and computational performance of MATSim-T. In: 2nd TRB Conference on Innovations in Travel Modeling, Portland 2008.  
<http://svn.vsp.tu-berlin.de/repos/public-svn/publications/vspwp/2008/08-07/PortlandMATSim-T.pdf>, abgerufen am 19.12.2017
- [7] *Bates, J.*: History of Demand Modelling. In: *Hensher, D. A.; Button, K. J.* (Hrsg.): *Handbook of Transport Modelling*. Handbooks in transport. Volume 1. 2. ed. ISBN: 978-0-08-045376-7. Elsevier, Amsterdam 2010, S. 11–34
- [8] Bayerisches Straßeninformationssystem (BAYSIS), WebGIS. Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr.  
<https://www.baysis.bayern.de/webgis/synserver?project=webgis>, abgerufen am 08.05.2019
- [9] *Ben-Akiva, M. E.; Lerman, S. R.*: Discrete choice analysis. Theory and application to travel demand. MIT Press series in transportation studies. 9. [Nachdr.]. ISBN: 0262022176. MIT Press, Cambridge, Mass. ca. 2006
- [10] *Bischoff, J.; Maciejewski, M.*: Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin. *Procedia Computer Science* 83 (2016), S. 237–244, abgerufen am 18.06.2019
- [11] *Bliemel, F.*: Theil's Forecast Accuracy Coefficient. A Clarification. *Journal of Marketing Research* Vol. X (1973), S. 444–446.  
[https://www.jstor.org/stable/3149394?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/3149394?seq=1#page_scan_tab_contents), abgerufen am 20.12.2017
- [12] *Bosserhoff, D.*: Programm Ver\_Bau. Abschätzung des Verkehrsaufkommens durch Vorhaben der Bauleitplanung mit Excel-Tabellen am PC. 2018.  
<http://www.dietmar-bosserhoff.de/Programm.html>, abgerufen am 26.02.2018
- [13] *Boyce, D. E.; Nie, Y. (M.); Bar-Gera, H.; Liu, Y.; Hu, Y.*: Field Test of a Method for Finding Consistent Route Flows and Multiple-Class Link Flows in Road Traffic Assignments, Final Report. Hrsg.: Federal Highway Administration, Washington, DC 2010.  
<http://translab.civil.northwestern.edu/nutrend/wp-content/uploads/2011/06/Boyce-et-al-Consistent-Route-Flows-Field-Test-2010.pdf>, abgerufen am 30.05.2016
- [14] *Boyce, D. E.; O'Neill, C. R.; Scherr, W.*: Solving the Sequential Travel Forecasting Procedure with Feedback. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2008) Nr. 2077, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., S. 129–135
- [15] *Boyce, D. E.; Ralevic-Dekic, B.; Bar-Gera, H.*: Convergence of Traffic Assignments. How Much is Enough? *Journal of Transportation Engineering* 130 (2004) Nr. 1, S. 49–55.  
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282004%29130%3A1%2849%29>, abgerufen am 17.12.2017
- [16] *Boyce, D. E.; Williams, H. C. W. L.*: Forecasting Urban Travel. Past, Present and Future. Paperback edition. ISBN: 978 1 84844 960 2. Edward Elgar Publishing, Cheltenham 2015
- [17] *Broach, J.; Dill, J.; Gliebe, J.*: Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (2012) Nr. 10, S. 1730–1740.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856412001164>, abgerufen am 26.04.2019
- [18] *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), INFRAS, Umweltbundesamt (BRD), Umweltbundesamt GmbH* (Hrsg.): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. HBEFA. Version 4.1, August 2019 2019

- [19] *Bundesanstalt für Straßenwesen* (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (Ausgabe 2002). TLS 2002. Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss, Bremerhaven 2002
- [20] *Bundesanstalt für Straßenwesen* (Hrsg.): BASt-Bestandsbandformat für Verkehrsmengendaten. Version 2004, BASt-Dateistruktur der Stundenwerte automatischer Dauerzählstellen, Bergisch Gladbach 2004
- [21] *Bundesanstalt für Straßenwesen*: MDM-Plattform. 2019. <https://service.mdm-portal.de/mdm-portal-application/>, abgerufen am 21.02.2020
- [22] *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur* (Hrsg.): Technische Vertragsbedingungen für Verkehrsuntersuchungen. TVB-Verkehrsuntersuchung 2014, abgerufen am 08.04.2016
- [23] *Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung* (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (Ausgabe 2012). TLS 2012, Berlin 2012. [https://www.bast.de/BASt\\_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Verkehrstechnik/Unterseiten/V5-tls-2012.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Verkehrstechnik/Unterseiten/V5-tls-2012.pdf?__blob=publicationFile&v=1), abgerufen am 18.02.2020
- [24] *Cambridge Systematics Inc.* (Hrsg.): FSUTMS-Cube Framework Phase I. Default Model Parameters, final report, Tallahassee, Florida 2006. [http://www.fsutmsonline.net/images/uploads/reports/FR1\\_FSUTMS-Cube\\_Parameters\\_All-in-One\\_Version\\_10-31-06%5B1%5D.pdf](http://www.fsutmsonline.net/images/uploads/reports/FR1_FSUTMS-Cube_Parameters_All-in-One_Version_10-31-06%5B1%5D.pdf), abgerufen am 04.11.2015
- [25] *Cambridge Systematics Inc.* (Hrsg.): FSUTMS-Cube Framework Phase II. Model Calibration and Validation Standards, final report, Tallahassee, Florida 2008. [http://www.fsutmsonline.net/images/uploads/reports/FR2\\_FDOT\\_Model\\_CalVal\\_Standards\\_Final\\_Report\\_10.2.08.pdf](http://www.fsutmsonline.net/images/uploads/reports/FR2_FDOT_Model_CalVal_Standards_Final_Report_10.2.08.pdf), abgerufen am 04.11.2015
- [26] *Cambridge Systematics Inc.*: Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual. Second Edition. 2nd ed. Hrsg.: Federal Highway Administration, Cambridge, Massachusetts 2014. <https://connect.ncdot.gov/projects/planning/tpb%20training%20presentations/fhwa%20model%20validation%20handbook.pdf>, abgerufen am 25.04.2019
- [27] *Ciari, F.; Axhausen, K. W.*: Choosing carpooling or carsharing as a mode: Swiss stated choice experiments. TRB 91st Annual Meeting Compendium of Papers (2012)
- [28] *Cowan, G.*: Statistical data analysis. With applications from particle physics. Oxford science publications. ISBN: 0198501560. Clarendon Press, Oxford 1998. [http://www.sherrytowers.com/cowan\\_statistical\\_data\\_analysis.pdf](http://www.sherrytowers.com/cowan_statistical_data_analysis.pdf), abgerufen am 12.06.2019
- [29] *de Jong, G.; Daly, A.; Pieters, M.; Miller, S.; Plasmeijer, R.; Hofman, F.*: Uncertainty in traffic forecasts. Literature review and new results for the netherlands. Hrsg.: Association for European Transport and contributors 2005. [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/working\\_papers/2005/RAND\\_WR268.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/working_papers/2005/RAND_WR268.pdf), abgerufen am 04.11.2015
- [30] *de Jong, G.; Pieters, M.; Daly, A.; Graafland, I.; Kroes, E.; Koopmans, C.*: Using the Logsum as an Evaluation Measure: Literature and Case Study. Literature and Case Study, Working Paper. Hrsg.: AVV Transport Research Centre 2005. [http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/working\\_papers/2005/RAND\\_WR275.pdf](http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/working_papers/2005/RAND_WR275.pdf), abgerufen am 30.05.2016
- [31] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M1. Principles of Modelling and Forecasting. Transport analysis guidance: WebTAG. M1 2014. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/427118/webtag-tag-unit-m1-1-principles-of-modelling-and-forecasting.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/427118/webtag-tag-unit-m1-1-principles-of-modelling-and-forecasting.pdf), abgerufen am 03.11.2015
- [32] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M1.2. Data Sources and Surveys. Transport analysis guidance: WebTAG. M1.2 2014. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/427119/webtag-tag-unit-m1-2-data-sources-and-surveys.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/427119/webtag-tag-unit-m1-2-data-sources-and-surveys.pdf), abgerufen am 03.11.2015
- [33] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M3.1. Highway Assignment Modelling. Transport analysis guidance: WebTAG. M3.1 2014. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/427124/webtag-tag-unit-m3-1-highway-assignment-modelling.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/427124/webtag-tag-unit-m3-1-highway-assignment-modelling.pdf), abgerufen am 03.11.2015
- [34] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M3.2. Public Transport Assignment. Transport analysis guidance: WebTAG. M3.2 2014. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/427126/webtag-tag-unit-m3-2-public-transport-assignment-modelling.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/427126/webtag-tag-unit-m3-2-public-transport-assignment-modelling.pdf), abgerufen am 03.11.2015
- [35] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M5.1. Modelling Parking and Park and Ride. Transport analysis guidance: WebTAG. M5.1 2014. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/427133/webtag-tag-unit-m5-1-modelling-parking-and-park-and-ride.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/427133/webtag-tag-unit-m5-1-modelling-parking-and-park-and-ride.pdf), abgerufen am 03.11.2015
- [36] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M5.2. Modelling Smarter Choices. Transport analysis guidance: WebTAG. M5.2 2014. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/427135/webtag-tag-unit-m5-2-modelling-smarter-choices.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/427135/webtag-tag-unit-m5-2-modelling-smarter-choices.pdf), abgerufen am 03.11.2015
- [37] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M2. Variable Demand Modelling. Transport analysis guidance: WebTAG. M2 2017. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/603266/webtag-tag-unit-m2-variable-demand-modelling-march-2017.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/603266/webtag-tag-unit-m2-variable-demand-modelling-march-2017.pdf), abgerufen am 14.12.2018
- [38] *Department for Transport* (Hrsg.): TAG UNIT M4. Forecasting and Uncertainty. Transport analysis guidance: WebTAG. M4 2018.

- [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/712788/tag-unit-m4-forecasting-and-uncertainty-may-2018.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/712788/tag-unit-m4-forecasting-and-uncertainty-may-2018.pdf), abgerufen am 13.12.2018
- [39] *Dugge, B.*: Ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell (EVA-U), Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden. Heft 9, Dresden 2006. <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/vnm/ressourcen/dateien/institutsschriftenreihe/Heft-09.pdf?lang=de>, abgerufen am 27.11.2017
- [40] *Fagnant, D. J.; Kockelman, K. M.*: Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation* 45 (2018) Nr. 1, S. 143–158, abgerufen am 17.06.2019
- [41] *Feldman, O.*: The GEH measure and quality of the highway assignment models. Hrsg.: *Transport for London*. 2012. <http://abstracts.aetransport.org/paper/download/id/3842>, abgerufen am 04.01.2016
- [42] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Empfehlungen zum Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen. EVNM, Entwurf des AK 1.2.6 "Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen des Personenverkehrs"
- [43] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen zur Berechnung des Wirtschaftsverkehrs, in Veröffentlichung
- [44] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Richtlinie für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen. RWS, Entwurf des AK 1.4.1
- [45] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen. ESN. FGSV. 383. Ausg. 2003. ISBN: 3937356142. FGSV Verlag, Köln 2003
- [46] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen. RLS-09. FGSV R1 - Regelwerke. 334. Ausg. 1990, korr. Nachdr. Feb. 1992. ISBN: 3937356142. FGSV Verlag, Köln 2003
- [47] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Grundlagen und Anwendungen. FGSV. 388. ISBN: 3939715115. FGSV Verlag, Köln 2006
- [48] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen. FGSV W1 - Wissensdokumente. 147. Ausg. 2006. ISBN: 3-939715-06-9. FGSV Verlag, Köln 2006
- [49] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen. RAA. FGSV R1 - Regelwerke. 202. Ausg. 2008. ISBN: 978 3 939715511. FGSV Verlag, Köln 2008
- [50] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen. RAS 06. FGSV R1 - Regelwerke. 200. Ausg. 2006, korr. Nachdr. Dez. 2008. ISBN: 9783939715214. FGSV Verlag, Köln 2008
- [51] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung. RIN. FGSV R1 - Regelwerke. 121. ISBN: 3939715794. FGSV Verlag, Köln 2008
- [52] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Begriffsbestimmungen. Teil: Verkehrsplanung, Straßentwurf und Straßenbetrieb. FGSV. 220. Ausg. 2012. ISBN: 9783864460241. FGSV Verlag, Köln 2012
- [53] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Empfehlungen für Verkehrserhebungen. EVE. FGSV. 125. ISBN: 9783941790995. FGSV Verlag, Köln 2012
- [54] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Richtlinien für die Anlage von Landstraßen. RAL. FGSV. 201. ISBN: 9783864460395. FGSV Verlag, Köln 2013
- [55] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. HBS. FGSV. 299. Ausg. 2015. ISBN: 9783864461033. FGSV Verlag, Köln 2015
- [56] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Empfehlungen für Verkehrsplanungsprozesse. EVP. FGSV R2 - Regelwerke. 116. Ausgabe 2018. ISBN: 978-3-86446-208-5. FGSV Verlag, Köln 2018
- [57] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Hinweise für die Durchführung von Haushaltsbefragungen zum Mobilitätsverhalten. Ergänzungen zu den EVE (Empfehlungen für Verkehrserhebungen) aus der Perspektive der Planungspraxis. FGSV W1 - Wissensdokumente. 125/1. Ausgabe 2018. ISBN: 978-3-86446-211-5. FGSV Verlag, Köln 2018. [https://www.fgsv.de/fileadmin/road\\_maps/125\\_1.pdf](https://www.fgsv.de/fileadmin/road_maps/125_1.pdf), abgerufen am 12.12.2019
- [58] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen. RLS-19. FGSV R1 - Regelwerke. 052. ISBN: 978-3-86446-256-6. FGSV Verlag, Köln 2019
- [59] *Friedrich, M.*: Wie viele? Wohin? Womit? Was können uns Verkehrsnachfragemodelle wirklich sagen? In: *Heureka '11. Optimierung in Verkehr und Transport*, 16./17. März 2011 Stuttgart. Heureka, 16.-17.03.2011, Stuttgart. Hrsg.: *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (FGSV). ISBN: 9783941790728. FGSV Verlag, Köln 2011. [https://www.isv-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/2011\\_Friedrich\\_Nachfragemodelle\\_Heureka2011\\_mit\\_Deckblatt.pdf](https://www.isv-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/2011_Friedrich_Nachfragemodelle_Heureka2011_mit_Deckblatt.pdf), abgerufen am 19.12.2017
- [60] *Friedrich, M.*: Verkehrsplanung und Verkehrsmodelle. Skript - WS 2017/2018. Hrsg.: *Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik* 2017
- [61] *Friedrich, M.; Hartl, M.; Magg, C.*: Impacts of Vehicle Sharing with Driverless Cars on Urban Transport. In: *Simulation Science. SimScience 2017*, April 27–28, 2017, Göttingen, Germany. ISBN: 978-3-319-96271-9. Springer International Publishing, Cham 2017, S. 24–38
- [62] *Friedrich, M.; Hartl, M.; Magg, C.*: A modeling approach for matching ridesharing trips within macroscopic travel demand models. *Transportation* 45 (2018) Nr. 6, S. 1639–1653. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11116-018-9957-5>, abgerufen am 12.06.2019

- [63] *Friedrich, M.; Leurent, F.; Jackiva, I.; Fini, V.; Raveau, S.*: From Transit Systems to Models: Purpose of Modelling. In: *Gentile, G.; Nökel, K.* (Hrsg.): *Modelling Public Transport Passenger Flows in the Era of Intelligent Transport Systems*. COST Action TU1004 (TransITS). Springer Tracts on Transportation and Traffic. 1st ed. 2016. ISBN: 978-3-319-25082-3. Springer, s.l. 2016, S. 131–234
- [64] *Friedrich, M.; Nökel, K.*: Modeling intermodal networks with public transport and vehicle sharing systems. *EURO J Transp Logist* 6 (2017) Nr. 3, S. 271–288.  
<http://rdcu.be/uR4r>, abgerufen am 12.06.2019
- [65] *Friedrich, M.; Pestel, E.; Schiller, C.; Simon, R.*: Scalable GEH: A Quality Measure for Comparing Observed and Modeled Single Values in a Travel Demand Model Validation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2673 (2019) Nr. 4, 722-732.  
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198119838849>, abgerufen am 21.08.2019
- [66] *Friedrich, M.; Richter, E.; Sonnleitner, J.*: Modellierung der Nachfragewirkungen von automatisierten Verkehrsmitteln und Mobilitätsdiensten. *Straßenverkehrstechnik* 63 (2019) Nr. 4, S. 268–276
- [67] *Friedrich, M.; Ritz, C.*: Was bringt wie viel? Alte und neue Verkehrs- und Mobilitätskonzepte für Städte? In: *Heureka '14. Optimierung in Verkehr und Transport, 2./3. April 2014 Stuttgart*. Heureka, 02.-03.04.2014, Stuttgart. Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). FGSV Verlag, Köln 2014.  
[http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publication/downloads/201404\\_fr\\_cr\\_jeureka\\_was\\_bringt\\_wie\\_viel.pdf](http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publication/downloads/201404_fr_cr_jeureka_was_bringt_wie_viel.pdf), abgerufen am 19.12.2017
- [68] *Friedrich, M.; Schiller, C.; Pestel, E.; Simon, R.; Schimpf, M.*: Einflussgrößen auf die Qualität von makroskopischen Nachfragemodellen im Personenverkehr. Influencing factors on the quality of macroscopic travel demand models, DFG-Projekt (FR 2666/3-1 & SCHI 1113/4-1) 2015-2019.  
<https://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/forschung/>, abgerufen am 14.05.2018
- [69] *Galster, M.*: Modellierung von Anbindungen in Verkehrsplanungsmodellen, Dissertation, Stuttgart 2008.  
[http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2009/3822/pdf/Dissertation\\_Galster.pdf](http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2009/3822/pdf/Dissertation_Galster.pdf), abgerufen am 20.11.2017
- [70] *Gasser, P.; Zhang, C.; Mortreux, C.; Nguyen, M. H.; Cabrera Delgado, J.; Sàarl, M.; Flamm, M.*: Modélisation macroscopique de la circulation cycliste et piétonne – bases. Makroskopische Modellierung des Fuss- und Veloverkehrs, SVI-Forschungsauftrag Nr. 2014/001, Genève 2017
- [71] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz) (BImSchG) (2013) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist.  
<https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/BImSchG.pdf>, abgerufen am 26.02.2018
- [72] *Haase, D.*: Gemeinsame Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik (NUTS). Hrsg.: Europäisches Parlament. 2016.  
[http://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/de/FTU\\_5.1.6.pdf](http://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/de/FTU_5.1.6.pdf), abgerufen am 29.08.2017
- [73] *Herk, S.; Leerkamp, B.; Althoff, T.; Goebel, D.; Janßen, T.; Meißner, A.*: QUALIMOD. Qualitätsanforderungen und -standards für Verkehrsmodellrechnungen 2008
- [74] *Hollander, Y.*: *Transport modelling for a complete beginner*. 1. Aufl. ISBN: 9780995662407. CTthink!, London 2016
- [75] *Hood, J.; Sall, E.; Charlton, B.*: A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California. *Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research* 3 (2011) Nr. 1, S. 63–75.  
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3328/TL.2011.03.01.63-75>, abgerufen am 26.04.2019
- [76] *Huelsenbeck, J. P.; Crandall, K. A.*: Phylogeny Estimation and Hypothesis Testing Using Maximum Likelihood. *Annual Review of Ecology and Systematics* 28 (1997), S. 437–466.  
[http://www.jstor.org/stable/pdf/2952500.pdf?\\_=1467361228073](http://www.jstor.org/stable/pdf/2952500.pdf?_=1467361228073), abgerufen am 23.04.2018
- [77] *Intraplan Consult GmbH; Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur* (Hrsg.): *Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen ÖPNV – Version 2016*. FE-Projekt 70.893/2014 2016.  
<http://www.intraplan.de/?p=11&r=58>, abgerufen am 26.02.2018
- [78] *Intraplan Consult GmbH; BVU Beratergruppe Verkehr+Umwelt GmbH; IVV GmbH & Co. KG; Planco Consulting GmbH*: *Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Zusammenfassung der Ergebnisse*, Forschungsprojekt FE-Nr. 96.0981/2011. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2014.  
[https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?__blob=publicationFile), abgerufen am 11.02.2019
- [79] *JASPERS Appraisal Guidance (Transport). The Use of Transport Models in Transport Planning and Project Appraisal*. Hrsg.: Jaspers 2014.  
[http://kc-sump.eu/wordpress/wp-content/uploads/2015/04/Uпотреba-Modela-u-prometnom-planiranju\\_JASPERS\\_kolovoz-2014.pdf](http://kc-sump.eu/wordpress/wp-content/uploads/2015/04/Uпотреba-Modela-u-prometnom-planiranju_JASPERS_kolovoz-2014.pdf), abgerufen am 04.11.2015
- [80] *Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Institut für Verkehrswesen*: *Deutsche Mobilitätspanel (MOP). Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen, Bericht 2016/2017: Alltagsmobilität und Fahrleistung*, Forschungsprojekt FE-Nr. 70.923/2015. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Karlsruhe 2018.  
[http://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht\\_MOP\\_16\\_17.pdf](http://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_16_17.pdf), abgerufen am 11.02.2019
- [81] *Köhler, U.; Zöllner, R.; Wermuth, M.; Emig, J.* (Hrsg.): *Analyse der Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 804. ISBN: 3934458378. Bundesdr. Zweigniederlassung Bonn, Bonn 2001
- [82] *Leerkamp, B.; Vollmer, R.; Dahmen, B.; Janßen, T.*: *Datenanforderungen an die Weiterentwicklung kleinräumiger Verkehrsnachfragemodelle des Wirtschaftsverkehrs, Praxisleitfaden zu den Datengrundlagen der kleinräumigen Wirtschaftsverkehrsmodellierung* 2013.

- [https://www.gut.uni-wuppertal.de/fileadmin/bauing/leerkamp/Downloads/KWM\\_70.0851-10\\_Praxisleitfaden\\_geschuetzt.pdf](https://www.gut.uni-wuppertal.de/fileadmin/bauing/leerkamp/Downloads/KWM_70.0851-10_Praxisleitfaden_geschuetzt.pdf), abgerufen am 23.01.2018
- [83] *Leerkamp, B.; Vollmer, R.; Dahmen, B.; Janßen, T.*: Datenanforderungen an die Weiterentwicklung kleinräumiger Verkehrsnachfragemodelle des Wirtschaftsverkehrs, Schlussbericht 2013. [https://www.gut.uni-wuppertal.de/fileadmin/bauing/leerkamp/Downloads/KWM\\_70.0851\\_10\\_Schlussbericht\\_geschuetzt.pdf](https://www.gut.uni-wuppertal.de/fileadmin/bauing/leerkamp/Downloads/KWM_70.0851_10_Schlussbericht_geschuetzt.pdf), abgerufen am 23.01.2018
- [84] *Littman, T.*: Understanding Transport Demands and Elasticities. How Prices and Other Factors Affect Travel Behavior 2018. <http://www.vtpi.org/elasticities.pdf>, abgerufen am 19.02.2019
- [85] *Löwa, S.*: Empfehlungen für die Bearbeitung der offiziellen Pendlerverflechtungsdaten. Arbeitsbericht, Hamburg 2017. [https://www.tuhh.de/t3resources/vpl/layout01INSTITUTE/pdf/Publication/wp/wp47\\_SonjaLoewa\\_Pendlerverflechtungsdate\\_n\\_TUHH\\_Institut\\_fuer\\_Verkehrsplanung\\_und\\_Logistik.pdf](https://www.tuhh.de/t3resources/vpl/layout01INSTITUTE/pdf/Publication/wp/wp47_SonjaLoewa_Pendlerverflechtungsdate_n_TUHH_Institut_fuer_Verkehrsplanung_und_Logistik.pdf), abgerufen am 02.10.2018
- [86] *Martin, N.; Lessmann, S.; Voss, S.*: Crowdsourcing. Systematisierung praktischer Ausprägungen und verwandter Konzepte: Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI 2008). München, 26.2.2008 - 28.2.2008 2008 – Proceedings, S. 1251–1263. [https://www.researchgate.net/publication/221508660\\_Crowdsourcing\\_Systematisierung\\_praktischer\\_Ausprägungen\\_und\\_verwandter\\_Konzepte](https://www.researchgate.net/publication/221508660_Crowdsourcing_Systematisierung_praktischer_Ausprägungen_und_verwandter_Konzepte), abgerufen am 08.05.2019
- [87] *Martínez, L. M.; Viegas, J. M.; Silva, E. A.*: A traffic analysis zone definition: a new methodology and algorithm. *Transportation* 36 (2009) Nr. 5, S. 581–599. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11116-009-9214-z.pdf>, abgerufen am 19.09.2018
- [88] *Menghini, G.; Carrasco, N.; Schüssler, N.; Axhausen, K. W.*: Route choice of cyclists in Zurich. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 44 (2010) Nr. 9, S. 754–765. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856410001187>, abgerufen am 26.04.2019
- [89] *Moeckel, R.; Donnelly, R.*: Gradual rasterization. Redefining the spatial resolution in transport modelling, Presented at the 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board in Washington, D.C. 2014. [https://moeckel.github.io/rm/doc/2014\\_moeckel\\_donnelly\\_trb.pdf](https://moeckel.github.io/rm/doc/2014_moeckel_donnelly_trb.pdf), abgerufen am 19.09.2018
- [90] Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK. Aktualisierung auf den Basiszustand 2010, Endbericht. Hrsg.: Bundesamt für Raumentwicklung (ARE); Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) 2014. [http://www.are.admin.ch/themen/verkehr/00256/00513/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,lnp6l0NTU042lZ26ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCEenx9gmym162epYbg2c\\_JjKbNoKSn6A--](http://www.are.admin.ch/themen/verkehr/00256/00513/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,lnp6l0NTU042lZ26ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCEenx9gmym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--), abgerufen am 04.08.2016
- [91] *Nobis, C.; Kuhnimhof, T.*: Mobilität in Deutschland - MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Referat G 13, Bonn, Berlin 2018. [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017\\_Ergebnisbericht.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf), abgerufen am 11.02.2019
- [92] NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics. Local Administrative Units (LAU). Hrsg.: Eurostat. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/local-administrative-units>, abgerufen am 29.08.2017
- [93] NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics. National Structures (non-EU). Hrsg.: Eurostat. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/correspondence-tables/national-structures-non-eu>, abgerufen am 29.08.2017
- [94] *Ortúzar, J. d. D.; Willumsen, L. G.*: Modelling transport. 3. ed. ISBN: 0471861103. Wiley, Chichester 2004
- [95] *Pedersen, N. J.; Samdahl, D. R.*: Highway traffic data for urbanized area project planning and design. NCHRP Report 255. NCHRP Report. 255. ISBN: 0-309-03450-7. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1982. <http://teachamerica.com/tih/PDF/nchrp255.pdf>, abgerufen am 27.02.2017
- [96] *Pestel, E.*: Considerations about the quality assessment of travel time and travel distance distributions in transport modelling. A proposal for a standardized methodology. *Transportation* (2020). <http://link.springer.com/article/10.1007/s11116-020-10095-y>, abgerufen am 11.03.2020
- [97] *Pestel, E.; Friedrich, M.; Heidl, U.; Pillat, J.; Schiller, C.; Schimpf, M.*: Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen. *Straßenverkehrstechnik* 60 (2016) Nr. 10, S. 658–670
- [98] *Pillat, J.*: Methoden zur Analyse und Prognose des Verkehrsaufkommens unter Berücksichtigung des Wetters auf Autobahnen, Dissertation. Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart. 49. ISBN: 9783981057386, Stuttgart 2014
- [99] *Prof. Dr. Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH; Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V.; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Kraftfahrt-Bundesamt.* Mobilitätsstudie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (KiD 2010). Ergebnisse im Überblick, Forschungsprojekt FE-Nr. 70.0829/2008. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Braunschweig 2012. [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/kid-2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/kid-2010.pdf?__blob=publicationFile), abgerufen am 26.04.2019
- [100] PTV AG (Hrsg.): PTV Visum 18. Handbuch 2018
- [101] *Ragnitz, J.; Berlemann, M.; Freese, Julia; Luik, M.-A.; Wesselhöft, J.-E.*: Verkehrsverflechtungsprognose 2030 sowie Netzumlegung auf die Verkehrsträger. Erstellung einer regionalisierten Strukturdatenprognose Los 1, Prognose der wirtschaftlichen Entwicklung 2010 bis 2030. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Hamburg 2012. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/strukturdatenprognose-2030.html>, abgerufen am 09.05.2019

- [102] *Raney, B.; Nagel, K.*: An improved framework for large-scale multi-agent simulations of travel behavior. In: *Rietveld, P.; Jourquin, B.; Westin, K.* (Hrsg.): Towards better performing European Transportation Systems. Routledge, London 2006
- [103] Raumstruktur und Siedlungsstruktur. Hrsg.: Akademie für Raumforschung und Landesplanung. 2018.  
<https://www.arl-net.de/de/lexica/de/raumstruktur-und-siedlungsstruktur>, abgerufen am 18.09.2018
- [104] Regionalstatistische Raumtypologie (RegioStaR). Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). 2018.  
<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/regionalstatistische-raumtypologie.html>, abgerufen am 27.05.2019
- [105] *Richter, E.; Friedrich, M.; Migl, A.; Hartleb, J.*: Integrating ridesharing services with automated vehicles into macroscopic travel demand models: Proceedings of 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, Kraków, Poland 2019
- [106] *Richter, E.; Friedrich, M.; Migl, A.; Hartleb, J.*: Integrating ridesharing services with automated vehicles into macroscopic travel demand models – Conference presentation. 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, Kraków, Poland, 2019
- [107] *Rieser, N.; Tasnády, B.; Friedrich, M.; Pestel, E.; Vries, N. de; Rothenfluh, M.; Fischer, R.*: Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen, SVI-Forschungsauftrag Nr. 2015/001 1645. Hrsg.: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK); Bundesamt für Strassen 2018.  
[http://www.mobilityplatform.ch/de/shop/show-item/product/25249/?q=Qualit%C3%A4tssicherung%20von%20Verkehrsmodellberechnungen&tx\\_solr%5Bfilter%5D%5B0%5D=facet\\_212\\_stringM%253AAktiv&tx\\_solr%5Bpage%5D=0&cHash=ec59533a27459c40984bb042381d0ae8](http://www.mobilityplatform.ch/de/shop/show-item/product/25249/?q=Qualit%C3%A4tssicherung%20von%20Verkehrsmodellberechnungen&tx_solr%5Bfilter%5D%5B0%5D=facet_212_stringM%253AAktiv&tx_solr%5Bpage%5D=0&cHash=ec59533a27459c40984bb042381d0ae8), abgerufen am 11.01.2019
- [108] *Ritz, C.*: Modellierung und Wirkung von Maßnahmen der städtischen Verkehrsplanung, Dissertation, Stuttgart 2019 [im Druck]
- [109] *Sammer, G.; Röschel, G.; Gruber, C.*: Qualitätssicherung für die Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen und Verkehrsprognosen. Quality Management and Model Validation for Application of Transport Demand Modelling and Forecast. Straßenforschung. Heft 604. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr, Wien 2012
- [110] *Schiller, C.*: Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung, Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden. 8, Dresden 2004.  
<https://d-nb.info/973092653/34>, abgerufen am 07.05.2019
- [111] *Schnabel, W.; Lohse, D.*: Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2. 3., vollst. überarb. Aufl. ISBN: 9783781218161. Beuth; Kirschbaum, Berlin 2011
- [112] *Scholles, F.*: Abschätzen, Einschätzen und Bewerten in der UVP. Weiterentwicklung der Ökologischen Risikoanalyse vor dem Hintergrund der neueren Rechtslage und des Einsatzes rechnergestützter Werkzeuge. UVP spezial. 13. ISBN: 3929797321. Dortmunder Vertrieb für Bau- und Planungsliteratur, Dortmund 1997
- [113] *Sener, I.; Eluru, N.; Bhat, C. R.*: An Analysis of Bicyclists and Bicycling Characteristics: Who, Why, and How Much are they Bicycling? Transportation Research Record 2134 (2009).  
[http://www.caee.utexas.edu/prof/bhat/ABSTRACTS/sener\\_eluru\\_bhat\\_bicycle\\_rev\\_Jan18\\_TRBstyle.pdf](http://www.caee.utexas.edu/prof/bhat/ABSTRACTS/sener_eluru_bhat_bicycle_rev_Jan18_TRBstyle.pdf), abgerufen am 26.04.2019
- [114] *Sener, I. N.; Eluru, N.; Bhat, C. R.*: An analysis of bicycle route choice preferences in Texas, US. Transportation 36 (2009) Nr. 5, S. 511–539.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11116-009-9201-4>, abgerufen am 26.04.2019
- [115] *Shell Deutschland Oil GmbH* (Hrsg.): Shell PKW-Szenarien bis 2030. Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität, Hamburg 2009.  
[https://www.shell.de/promos/media/shell-passenger-car-scenarios-2009/\\_jcr\\_content.stream/1455704838555/462b274ae6101ab230139f431a1fac3e498ce528d6168149e615daf195a08240/publications-2009shellmobilityscenarios.pdf](https://www.shell.de/promos/media/shell-passenger-car-scenarios-2009/_jcr_content.stream/1455704838555/462b274ae6101ab230139f431a1fac3e498ce528d6168149e615daf195a08240/publications-2009shellmobilityscenarios.pdf), abgerufen am 11.02.2019
- [116] *Shell Deutschland Oil GmbH; Prognos AG* (Hrsg.): Shell PKW-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität, Basel 2014.  
[https://www.shell.de/promos/media/shell-passenger-car-scenarios-to-2040/\\_jcr\\_content.stream/1455700315660/b2e5b602c04e57cf59e2f047567f2510b8780ef8b9984ec1abd365706996f98e/s hell-pkw-szenarien-bis-2040-vollversion.pdf](https://www.shell.de/promos/media/shell-passenger-car-scenarios-to-2040/_jcr_content.stream/1455700315660/b2e5b602c04e57cf59e2f047567f2510b8780ef8b9984ec1abd365706996f98e/s hell-pkw-szenarien-bis-2040-vollversion.pdf), abgerufen am 11.02.2019
- [117] *Simon, R.; Schiller, C.; Friedrich, M.; Pestel, E.*: Generalizing the relative gap for measuring the convergence of a logit-based user-equilibrium assignment. TRB Annual Meeting 2019, Washington, D.C.
- [118] *Simon, R.; Schiller, C.; Pestel, E.; Friedrich, M.*: Next Generation Verkehrsnachfragemodelle. In: Heureka '20. Optimierung in Verkehr und Transport. Proceedings, 1./2. April 2020 Stuttgart. Heureka, 01.-02.04.2020, Stuttgart. Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). FGSV Verlag, Köln 2020
- [119] *SSP Consult Beratende Ingenieure GmbH*: Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Mittelfristprognose Winter 2017/2018, Forschungsprojekt FE-Nr. 97.0348/2015, Waldkirch / Köln 2018.  
[https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Verkehrsprognose/verkehrsprognose\\_Winter\\_2017\\_2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Verkehrsprognose/verkehrsprognose_Winter_2017_2018.pdf?__blob=publicationFile), abgerufen am 11.02.2019
- [120] *Statistisches Bundesamt*: Verkehr NST-2007. Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik – 2007, Wiesbaden. 2007
- [121] *Statistisches Bundesamt*: WZ 2008. Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008, Wiesbaden. 2008
- [122] *Steierwald, G.; Kühne, H. D.; Vogt, W.* (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele. 2., neu bearb. und erw. Aufl. ISBN: 3-540-40588-7. Springer, Berlin 2005

- [123] *Steyer, R.; Feser, B.; Knelangen, F.-J.*: Qualität von Daten im Straßen- und Verkehrswesen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. 904. ISBN: 3-86509-202-0. Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss, Bremerhaven 2004
- [124] *Technische Universität Dresden, Lehrstuhl Verkehrs- und Infrastrukturplanung* (Hrsg.): *Mobilität in Städten - SrV 2018*, Dresden
- [125] *The Highways Agency; The Scottish Office Development Department; The Welsh Office Y Swyddfa Gymreig; The Department Of The Environment For Northern Ireland; The Department Of Transport* (Hrsg.): *Traffic Appraisal in Urban Areas*. Design Manual for Roads and Bridges. Volume 12. ISBN: 0115534849 1996.  
<http://www.standardsforhighways.co.uk/dmrb/vol12/section2/12s2p1.pdf>, abgerufen am 01.04.2016
- [126] *Traffic assignment manual for application with a large, high speed computer*. 1. Aufl. Hrsg.: U.S. Dept. of Commerce, Bureau of Public Roads, Office of Planning, Urban Planning Division, Washington, D.C. 1964.  
<https://hdl.handle.net/2027/wu.89046875241>, abgerufen am 23.05.2018
- [127] *van Zuylen, H. J.; Willumsen, L. G.*: The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research Part B: Methodological* (1980) Nr. Vol. 14B, pp. 281-293.  
[https://ac.els-cdn.com/0191261580900089/1-s2.0-0191261580900089-main.pdf?\\_tid=442b0dbe-0035-11e8-8505-0000aab0f6c&acdnat=1516709121\\_e08c1cdc2b75e520771c7f9c89a93335](https://ac.els-cdn.com/0191261580900089/1-s2.0-0191261580900089-main.pdf?_tid=442b0dbe-0035-11e8-8505-0000aab0f6c&acdnat=1516709121_e08c1cdc2b75e520771c7f9c89a93335), abgerufen am 23.01.2018
- [128] *Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2017*. Hrsg.: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). 2019.  
[https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr\\_in\\_kilometern\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html), abgerufen am 09.05.2019
- [129] *Verordnung (EG) Nr. 105/2007 der Kommission vom 1. Februar 2007 zur Änderung der Anhänge der Verordnung (EG) Nr. 1059/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Schaffung einer gemeinsamen Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik (NUTS) (EG Nr. 105/2007) (2007)*.  
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R0105&from=DE>, abgerufen am 29.08.2017
- [130] *Vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an VBUS*. Hrsg.: Bundesanstalt für Straßenwesen 2006.  
[https://www.bast.de/BASt\\_2017/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Verkehrstechnik/Downloads/f3-VBUS-berechnungsmethode.pdf;jsessionid=C7883D940DCF6E277B6D54C0C42239DB.live21304?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Verkehrstechnik/Downloads/f3-VBUS-berechnungsmethode.pdf;jsessionid=C7883D940DCF6E277B6D54C0C42239DB.live21304?__blob=publicationFile&v=6), abgerufen am 16.09.2019
- [131] *Vortisch, P.*: *Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstraßennetzen*, Dissertation. Schriftenreihe, Universität Karlsruhe (TH). 64. ISBN: 3-9804741-9-4, Karlsruhe 2006
- [132] *Vrtic, M.; Schüssler, N.; Erath, A.; Bürgle, M.; Axhausen, K. W.; Frejinger, E.; Stojanovic, J.; Bierlaire, M.; Rudel, R.; Scagnolari, S.; Maggi, R.*: Einbezug von Reisekosten bei der Modellierung des Mobilitätsverhaltens, SVI-Forschungsauftrag Nr. 2005/004. Hrsg.: Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK); Bundesamt für Strassen, Bern 2007.  
<http://webarchiv.ethz.ch/ivt/vpl/publications/reports/ab503.pdf>, abgerufen am 05.09.2017
- [133] *Wardrop, J. G.*: *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research*. *Proceedings of the Inst. of Civil Engineering London* (1952), S. 325–378
- [134] *Was gehört alles zu einem KV-Terminal? Technik im Kombinierten Verkehr*. Hrsg.: Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr e.V., Berlin. 2012.  
[http://www.sgkv.de/images/pdf/SGKV\\_Flyer%20KV%20Terminal.pdf](http://www.sgkv.de/images/pdf/SGKV_Flyer%20KV%20Terminal.pdf), abgerufen am 26.09.2018
- [135] *Weis, C.; Vrtic, M.; Axhausen, K. W.; Balac, M.*: *SP-Befragung 2015 zum Verkehrsverhalten*. Grundlagen. Hrsg.: Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) 2016.  
<https://www.are.admin.ch/are/de/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/stated-preference-befragung.html>, abgerufen am 09.03.2020
- [136] *Wermuth, M.*: *Modellvorstellungen zur Prognose*. In: *Steierwald, G.; Kühne, H. D.; Vogt, W.* (Hrsg.): *Stadtverkehrsplanung*. Grundlagen, Methoden, Ziele. 2., neu bearb. und erw. Aufl. ISBN: 3-540-40588-7. Springer, Berlin 2005
- [137] *Yin, B.; Liu, L.; Coulombel, N.; Vigié, V.*: Evaluation of ridesharing impacts using an integrated transport land-use model: a case study for the Paris region. *Transportation Research Procedia* 27 (2017), S. 824–831, abgerufen am 18.06.2019
- [138] *Zhao, Y.; Kockelman, K. M.*: The propagation of uncertainty through travel demand models: an exploratory analysis. *Annals of Regional Science* 36 (2002) Nr. 1, S. 145–163.  
[http://www.cae.utexas.edu/prof/kockelman/public\\_html/ARS01ErrorPropagation.pdf](http://www.cae.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/ARS01ErrorPropagation.pdf), abgerufen am 04.11.2015

## 12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Arbeitsschritte zur Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells und Zuordnung der Arbeitsschritte zu den Kapiteln des Berichts.....	12
Abbildung 2-1:	Rückkopplung zwischen den Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden, der Verkehrsnachfrage und der Angebotsqualität (Bildquelle: Friedrich et al. [63]).....	19
Abbildung 2-2:	Das Vier-Stufen Modell mit den wesentlichen Eingangsgrößen: Siedlungsstrukturdaten, Verhaltensdaten, Verkehrsangebotsdaten (Bildquelle: Friedrich [60]). .....	21

Abbildung 2-3:	Ein Vier-Stufen Modell für den regionalen Wirtschaftsverkehr mit den wesentlichen Eingangsgrößen: Siedlungsstrukturdaten, Wirtschaftsverhaltensdaten, Verkehrsangebotsdaten (Bildquelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Friedrich [60]).....	23
Abbildung 2-4:	Rückkopplung zwischen Verkehrsnachfrage und Reisezeit (Bildquelle: Friedrich [60]). .....	25
Abbildung 2-5:	Zusammenhang zwischen Aktivitätenkette, Wegekette und Nachfragematrix. (Bildquelle: Friedrich [60])... 30	
Abbildung 2-6:	Zusammenhang zwischen Transportnachfrage und Tour (eigene Darstellung nach Lohse & Schnabel [111]). .....	31
Abbildung 2-7:	Räume und Verkehrsarten in einem Verkehrsnachfragemodell. ....	32
Abbildung 2-8:	Aufbau eines Verkehrsplanungsmodells (Bildquelle: in Anlehnung an Friedrich [59]). .....	34
Abbildung 2-9:	Aufbau einer Nachfragematrix. ....	36
Abbildung 5-1:	Grundstruktur stochastischer Entscheidungsmodelle. ....	73
Abbildung 5-2:	Grundstruktur eines Verkehrserzeugungsmodells. ....	74
Abbildung 5-3:	Grundstruktur eines Zielwahlmodells mit Randsummenbedingungen basierend auf einem Entscheidungsmodell vom Typ Logit. ....	77
Abbildung 5-4:	Grundstruktur eines Zielwahlmodells mit quelseitiger Fixierung (ohne Randsummenbedingungen) basierend auf einem Entscheidungsmodell vom Typ Logit. ....	78
Abbildung 5-5:	Einbeziehung einer empirischen Pendlermatrix in die Nutzenfunktion. ....	80
Abbildung 5-6:	Grundstruktur eines Moduswahlmodells basierend auf einem Entscheidungsmodell vom Typ Logit. ....	83
Abbildung 5-7:	Vergleich eines beispielhaften Entscheidungsmodells mit mittleren Kenngrößen und LogSums. ....	85
Abbildung 5-8:	Grundstruktur eines hierarchisch simultanen Ziel- und Moduswahlmodells vom Typ Nested-Logit mit Gewichtung und quelseitiger Fixierung. ....	89
Abbildung 5-9:	Grundstruktur eines vollständig simultanen Ziel- und Moduswahlmodells mit Randsummenbedingungen basierend auf einem Entscheidungsmodell vom Typ Logit. ....	90
Abbildung 5-10:	Beispiel für die Eigenständigkeit von Routenwahlalternativen (Bildquelle: in Anlehnung an Rieser et al.[107]). .....	95
Abbildung 5-11:	Beispiel für proportionale und nicht proportionale Routenbelastungen in einer Netzmasche (Bildquelle: in Anlehnung an Rieser et al. [107]). .....	96
Abbildung 5-12:	Relative Gap als Konvergenzkenngröße bei der Gleichgewichtsumlegung.....	97
Abbildung 5-13:	Wertebereich für die Parameter einer Widerstandsfunktion für den Pkw bzw. Lkw. ....	99
Abbildung 5-14:	Wertebereich für die Parameter einer ÖV-Umlegung.....	105
Abbildung 5-15:	Anwendung Matrixkorrekturverfahren.....	111
Abbildung 5-16:	Kombination verschiedener Matrixkorrekturverfahren.....	113
Abbildung 5-17:	Beispiel für die Ermittlung des Prognosematrixwerts aus einer Differenz- und einer Faktormatrix. ....	114
Abbildung 5-18:	Methoden zur Ermittlung der Kenngrößenwerte im Zellbinnenverkehr. ....	123
Abbildung 5-19:	Sharingangebote als Konkurrenz zum ÖV erfordern einen zusätzlichen Modus. Sharingangebote als Teil des ÖV werden in die ÖV-Umlegung integriert (Bildquelle: in Anlehnung an Richter et al. [106]). ....	132
Abbildung 5-20:	Einbindung von Sharingangeboten in die Modellstufen eines Verkehrsnachfragemodells (Bildquelle: in Anlehnung an Friedrich et al. [66]). ....	136
Abbildung 6-1:	Ausschnitt aus BAYSIS (Bayerisches Straßeninformationssystem). Alle klassifizierte Straßen sind farbig dargestellt. Die grauen Straßen sind nicht im BAYSIS enthalten und sind nur als Rasterdaten im Hintergrund dargestellt (Bildquelle: BAYSIS [8]). ....	143
Abbildung 6-2:	Ausschnitt aus HERE© Straßennetzkarte (2017-Q2, Darstellung in PTV Visum), alle Straßen sind Teil der Datenbasis. ....	144
Abbildung 6-3:	Ausschnitt aus TomTom© Straßennetzkarte (2017-06, Darstellung in PTV Visum), alle Straßen sind Teil der Datenbasis. ....	145

Abbildung 6-4:	Ausschnitt aus OpenStreetMap Straßennetzkarte (2018-01, Darstellung in PTV Visum), alle Straßen sind Teil der Datenbasis. ....	146
Abbildung 8-1:	Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells (Bildquelle: in Anlehnung an Pestel et al. [97]). ....	171
Abbildung 8-2:	oben: Verlauf der unteren und oberen Grenzen für die berechneten Werte $m$ für einen $GEH$ -Wert von 5, 10 und 15 (Bildquelle: Friedrich & Ritz [67]). unten: Verlauf der zulässigen relativen Abweichung für einen $GEH$ -Wert von 5, 10 und 15 (Bildquelle: Friedrich et al. [65]). ....	180
Abbildung 8-3:	Beurteilung verschiedener Kenngrößen mit dem $SQV$ -Wert. ....	185
Abbildung 8-4:	Bewertung der Abweichung für Einzelwerte von Fahrtzeiten (Bildquelle: Friedrich et al. [68]). ....	186
Abbildung 8-5:	Zulässige $\%RMSE$ -Werte in Abhängigkeit von der Verkehrsstärkenklasse [26] und Klasseneinteilung nach Sammer et al. [109] (Bildquelle: Pestel et al. [97]). ....	189
Abbildung 8-6:	Beispielhafte $SQV$ -Auswertung für den Fall, dass eine Strecke halbiert wird: oben bezogen auf die Streckenanzahl, unten bezogen auf die Streckenlänge. Es wird deutlich, dass der Bezug auf die Streckenlänge dazu führt, dass sich die Anteilswerte in der jeweiligen Güteklasse nicht ändern. (Bildquelle: Friedrich et al. [68]). ....	190
Abbildung 8-7:	Vergleich einer gemessenen und einer modellierten Reisezeitverteilung (Bildquelle: Pestel et al. [97]). ...	190
Abbildung 8-8:	Quantifizierung der Übereinstimmung von Verteilungen mit dem Coincidence Ratio (Bildquelle: in Anlehnung an Pestel [96]). ....	193
Abbildung 8-9:	Berechnung der mittleren, relativen Änderung $r$ zwischen zwei Matrizen. [68]. ....	194
Abbildung 8-10:	Beispielhafte Darstellung einer Verkehrsstärkedifferenzkarten für die Beurteilung der Wirkungen der Matrixkorrektur. ....	198
Abbildung 8-11:	Beispielhafte Darstellung des Quell- und Zielverkehrs eines Stadtbezirks (Stuttgart-Mitte). ....	198
Abbildung 8-12:	Beispielhafter Vergleich von erhobenen und modellierten Routenfahrtzeiten wobei die erhobenen Fahrtzeiten eine gewisse Streuung aufweisen (Bildquelle: modifizierte Darstellung nach [125]). ....	199
Abbildung 8-13:	Beispielhafte Darstellung ausgewählter Relationen zwischen Stuttgarter Stadtbezirken mittels Chord-Diagramm: links: alle Relationen, rechts: nur die Relationen die „Stuttgart-Mitte“ als Quell- oder Zielstadtbezirk haben. ....	199
Abbildung 8-14:	Visualisierung von Matrizen am Beispiel des Modal-Splits von zu Fuß zurückgelegten Wegen. Durch die Einfärbung werden besondere Relationen sichtbar – in diesem Fall Relationen mit einer hohen Fuß-Nachfrage innerhalb und zwischen den Verkehrszellen von Stuttgart-Mitte und Stuttgart-West. (Legende: grau = Anteil < 1%, Farbverlauf von gelb (1%) zu blau (100%)). ....	200
Abbildung 10-1:	Beispielhafte Darstellung einer Maßnahmenbeschreibung. ....	227
Abbildung 10-2:	Beispiel für ein Masternetzmodell mit einem Maximalnetz, das zwei Planfälle enthält. ....	228
Abbildung 10-3:	Aufbau eines Szenariomanagementsystems (bzw. Planfallmanagementsystems). ....	229
Abbildung 10-4:	Darstellungsarten von Kenngrößen der Verkehrsnachfrage für zwei Zustände (siehe Tabelle 10-2). Für jede Darstellungsart werden die Änderungen für die Modi Pkw und Rad angegeben. Je nach Darstellungsart ergeben sich für dieselben Zustände unterschiedliche Ergebnisse: Von einem Rückgang im Pkw-Verkehr um 5% (a) bis zu einer Zunahme um 32% (e bzw. g). ....	234
Abbildung 14-1:	Gegenüberstellung der zulässigen Abweichungen des $GEH$ -Werts und der Grenzen in NCHRP-255 [95]. ....	266
Abbildung 14-2:	Vergleich der zulässigen relativen Abweichung der Gütemaße $GEH$ und $SQV$ (bei $f = 1.000$ ). ....	269
Abbildung 14-3:	Orientation Ratio des Zielstadtbezirks Stuttgart-Feuerbach / Weilimdorf. ....	274
Abbildung 14-4:	Beispielhafte Darstellung der Zielstadtbezirke für ausgewählte Verkehrsströme mit dem Quellstadtbezirk „Stuttgart-Mitte“ als Kartendarstellung (Stuttgart-Mitte weist einen hohen Binnenverkehrsanteil auf). ....	280
Abbildung 14-5:	Beispielhafte Darstellung der Quellstadtbezirke für ausgewählte Verkehrsströme mit dem Zielstadtbezirk „Stuttgart-Mitte“ als Word Cloud (Stuttgart-Mitte weist einen hohen Binnenverkehrsanteil auf). ....	280
Abbildung 14-6:	Beispiel einer Parameterschätzung mit der Maximum Likelihood Methode. ....	283
Abbildung 14-7:	Vergleich der Elastizitätsfunktionen ( $\alpha = -1$ ). ....	288

Abbildung 14-8:	Beispiel für die Berechnung der zulässigen Abweichungen bei gegebenem $SOV$ -Wert, unter Berücksichtigung von Standardabweichung und Stichprobenfehler (Bildquelle: in Anlehnung an Friedrich et al. [65]).....	301
Abbildung 14-9:	Beispiel einer äquiquantilen Reiseweitenverteilung. ....	305
Abbildung 14-10:	Modellspezifikationsgenerator – Allgemeine Angaben.....	312
Abbildung 14-11:	Modellspezifikationsgenerator – Teil „Navigation, Erstellen eines Berichts, Speicher/Laden/Initialisieren“. .....	312
Abbildung 14-12:	Modellspezifikationsgenerator – Teil „Siedlungsstruktur“.....	313
Abbildung 14-13:	Modellspezifikationsgenerator – Teil „Veranlassung der Modellerstellung“.....	313
Abbildung 14-14:	Modellspezifikationsgenerator – Teil „Zu Evaluierende Maßnahmen“.....	314
Abbildung 14-15:	Modellspezifikationsgenerator – Teil „Gewünschte Kenngrößen als Modelloutput“.....	314

## 12.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Übersicht über die Projektergebnisse.....	10
Tabelle 2-1:	Verkehrsrelevante Entscheidungen und ihre Abbildung in Verkehrsmodellen.....	17
Tabelle 2-2:	Terminologie zum Personen- und Wirtschaftsverkehr.....	18
Tabelle 3-1:	Verwendete Abkürzungen für die Analyse der Veröffentlichungen.....	39
Tabelle 3-2:	Überblick über wesentliche Aussagen der Veröffentlichungen zum Aufbau und zur Qualität von Verkehrsnachfragemodellen.....	41
Tabelle 3-3:	Wirkungen verkehrsplanerischer Handlungsansätze auf die Modellstruktur (nach [81]).....	43
Tabelle 3-4:	Modulartige Qualitätsspezifikationen (eigene Darstellung nach [73]).....	44
Tabelle 3-5:	WebTAG - Validierungskriterien Umlegung Straße für stündliche Verkehrsstärken.....	55
Tabelle 3-6:	WebTAG - Realitätstests mit Zielbereichen für Nachfrageelastizität.....	56
Tabelle 3-7:	Überblick über wesentliche Anforderungen zum Aufbau und zur Qualität von Verkehrsnachfragemodellen aus öffentlichen Ausschreibungen (sortiert nach Jahr).....	62
Tabelle 4-1:	Checkliste zum Anlass einer Modellerstellung: Für welche Aufgabenstellungen soll das Modell eingesetzt werden?.....	64
Tabelle 4-2:	Checkliste Bezugszeitraum: Welche Zeiträume sollen das Modell abbilden?.....	65
Tabelle 4-3:	Checkliste Einsatzbereiche: Welche Entwicklungen und Maßnahmen sollen berücksichtigt werden?.....	67
Tabelle 4-4:	Checkliste Kenngrößen: Welche Kenngrößen soll das Modell liefern und in welcher Differenzierung?.....	68
Tabelle 5-1:	Hinweise und Empfehlungen zu Entscheidungsmodellen.....	73
Tabelle 5-2:	Hinweise und Empfehlungen zu Verkehrserzeugungsmodellen.....	75
Tabelle 5-3:	Hinweise und Empfehlungen zu Zielwahlmodellen.....	81
Tabelle 5-4:	Hinweise und Empfehlungen zu Moduswahlmodellen.....	86
Tabelle 5-5:	Hinweise und Empfehlungen zur simultanen Aktivitäten- und Moduswahl.....	87
Tabelle 5-6:	Hinweise und Empfehlungen zur simultanen Ziel- und Moduswahl.....	91
Tabelle 5-7:	Hinweise und Empfehlungen zur Abfahrtszeitwahl.....	92
Tabelle 5-8:	Hinweise und Empfehlungen zu Umlegungsmodellen für den IV.....	101
Tabelle 5-9:	Eigenschaften von Umlegungsmodellen für den ÖV.....	103
Tabelle 5-10:	Hinweise und Empfehlungen zu Umlegungsmodellen für den ÖV.....	106
Tabelle 5-11:	Hinweise und Empfehlungen zu Rückkopplungen zwischen den Modellstufen.....	109

Tabelle 5-12:	Korrekturwerte in den Modellstufen. ....	110
Tabelle 5-13:	Hinweise und Empfehlungen zum Einsatz von Korrekturverfahren. ....	114
Tabelle 5-14:	Hinweise und Empfehlungen zum Planungsraum und Untersuchungsraum. ....	115
Tabelle 5-15:	Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur. ....	117
Tabelle 5-16:	Unterteilung von Straßen in Straßenfunktionsklassen. ....	120
Tabelle 5-17:	Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung des Verkehrsangebots. ....	122
Tabelle 5-18:	Hinweise und Empfehlungen zur Berechnung der Kenngrößenmatrizen. ....	124
Tabelle 5-19:	Beispiele für eine Segmentierung von Wegezwecken. ....	126
Tabelle 5-20:	Beispiele für eine Segmentierung von Personengruppen. ....	126
Tabelle 5-21:	Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung der Verkehrsnachfrage im Personenverkehr. ....	127
Tabelle 5-22:	Beispiele für eine Klassifikation von Gutarten oder Wirtschaftszweigen / Branchen. Dargestellt ist jeweils nur die höchste Klassifikationsebene. ....	128
Tabelle 5-23:	Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung der Verkehrsnachfrage im Wirtschaftsverkehr. ....	129
Tabelle 5-24:	Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung der Verkehrsnachfrage im Eventverkehr. ....	130
Tabelle 5-25:	Hinweise und Empfehlungen zur Abbildung von Sharingangeboten. ....	137
Tabelle 5-26:	Hinweise und Empfehlungen zum externen Verkehr. ....	139
Tabelle 5-27:	Hinweise und Empfehlungen zu Prognosen. ....	141
Tabelle 6-1:	Beispielfaktoren nach Bosserhoff [12]. ....	158
Tabelle 6-2:	Fahrzeugklassifizierung des BAST-Bestandsbandformats nach [20]. ....	162
Tabelle 7-1:	Anforderungen an eine Modellierungssoftware. ....	167
Tabelle 7-2:	Empfehlung für eine Folge von Tests zum Vergleich der Ergebnisse eines Softwareupdates. Liefert ein Test Ergebnisse ohne Abweichungen, dann können die folgenden Tests entfallen. ....	169
Tabelle 8-1:	Beispiele für Kenngrößen mit einer hohen und niedrigen Aggregation der Nachfrage nach Friedrich et al. [68]. ....	176
Tabelle 8-2:	Übersicht über Gütemaße für die Überprüfung der Modellergebnisse. ....	178
Tabelle 8-3:	Skalierungsfaktor $f$ für verschiedene Kenngrößen. ....	182
Tabelle 8-4:	Beispiele für die Umrechnung von aggregierten Kenngrößen im Untersuchungsraum in personenbezogene Kenngrößen. Die Werte beziehen sich immer nur auf Wege mit Quelle und Ziel im Untersuchungsraums. ....	183
Tabelle 8-5:	Vorschlag für Qualitätsbereiche des Gütemaßes $g_{SQV}$ . Zum Vergleich sind die entsprechenden Werte des Gütemaßes $g_{GEH}$ für stündliche Verkehrsstärken ( $f = 1.000$ und $c = 1.000$ ) dargestellt. Bei der Ermittlung des Gütemaßes $g_{SQV}$ ist der Stichprobenumfang und die Streuung der Erhebungswerte zu berücksichtigen (siehe Anlage 2.4). ....	183
Tabelle 8-6:	Gegenüberstellung der vorgestellten Gütemaße für einen Matrixvergleich. [68]. ....	197
Tabelle 8-7:	Beispiele für Mängel bei den Eingangsdaten. ....	203
Tabelle 8-8:	Empfehlungen zur Überprüfung der Modellergebnisse. ....	208
Tabelle 8-9:	Empfehlungen zur Überprüfung des Modellverhaltens. ....	212
Tabelle 10-1:	Ergebnisse eines Verkehrsnachfragemodells. ....	231
Tabelle 10-2:	Fiktive Beispielergebnisse einer Modellrechnung für zwei Zustände. ....	233
Tabelle 14-1:	Umrechnung von $MGEH$ in $SQV$ . ....	268
Tabelle 14-2:	Vergleich der Gütemaße $GEH$ und $SQV$ . ....	269
Tabelle 14-3:	Wertebereich von Elastizitäten. ....	285
Tabelle 14-4:	Wertebereich von Elastizitäten. ....	290

---

Tabelle 14-5:	Optionen bei der Wahl der Klassierungskenngröße.....	302
Tabelle 14-6:	Beispiel für die Erzeugung äquiquantiler Klassen (Eingangsgroßen).....	307
Tabelle 14-7:	Beispiel für die Erzeugung äquiquantiler Klassen (Berechnung).....	308
Tabelle 14-8:	Beispiel für die Erzeugung äquiquantiler Klassen (Ergebnis).....	308

## 13 Glossar und Nomenklatur

### 13.1 Glossar und Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Bedeutung
Aktivitätenwahl (Verkehrserzeugung)	Bezeichnet die erste Stufe des Vier-Stufen-Modells. In der ~ wird die Zahl der Ortsveränderungen bestimmt, die von den Bewohnern des Untersuchungsraumes in einem Zeitraum durchgeführt werden. Ergebnis dieses Teilmodells sind die produzierten und angezogenen Ortsveränderungen einer Nachfragegruppe.
Analysefall (Analysezustand, Ist-Zustand)	~ beschreibt den Zustand für den Zeitpunkt, für den das Verkehrsnachfragemodell mit erhobenen Daten kalibriert und validiert wurde. Der Zeitpunkt dieses Zustandes liegt in der Vergangenheit.
Analysezeitpunkt	~ beschreibt den Zeitpunkt des Analysefalls. Das Verkehrsnachfragemodell wird für den ~ mit erhobenen Daten kalibriert und validiert.
Anpassungszeit	~ bezeichnet die Zeitdifferenz zwischen der Wunschabfahrtszeit des Fahrgastes und der angebotenen Abfahrtszeit.
ANPR	Automatische Nummernschilderkennung (Automatic Number Plate Recognition)
API	Application Programming Interface: Eine ~ -Schnittstelle ermöglicht den Zugriff auf online gespeicherte Daten.
Außenraum	~ umfasst den Raum außerhalb des Planungsraumes und besitzt keine oder nur eine geringe verkehrliche Wechselwirkung mit dem Planungsraum. Der ~ symbolisiert den „Rest der Welt“. [111]
BA	Bundesagentur für Arbeit
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Befragung	siehe Mobilitätserhebung
Betrachtungszeitraum	~ beschreibt den zeitlichen Rahmen, den das Modell repräsentiert, z.B. bei einem Tagesmodell einen (Werk-)Tag oder bei einem Spitzenstundenmodell die jeweiligen Spitzenstunden.
Bezugsfall (Referenzfall, Planungsnullfall)	~ beschreibt den Zustand für einen Zeitpunkt in der Zukunft. Dieser Prognosezeitpunkt liegt bezogen auf den Analysezeitpunkt meist zwischen 10 und 20 Jahren in der Zukunft. Der Bezugsfall enthält Annahmen über eine Menge von – als gesichert anzunehmenden – Entwicklungen und Maßnahmen, die bis zu diesem Zeitpunkt eingetreten sein werden.
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Choice Set	Menge der alternativen Handlungsoptionen, aus denen ein Entscheider auswählen kann
COM	Component Object Model: Windows Programmierschnittstelle zur Programmsteuerung mit Visual Basic, Python oder anderen Programmiersprachen
CR	Coincidence Ratio; Gütemaß für die Validierung von Verteilungen. Für weitere Informationen siehe Kapitel 8.4.3.
CR-Funktion	Eine CR-Funktion (Capacity-Restrain-Funktion) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Auslastung und der Fahrtzeit einer Strecke im Kfz-Verkehr. Auch wenn Capacity Restraint ein englischer Begriff ist, wird in englischsprachigen Ländern von Volume-Delay-Funktionen (VDF) gesprochen.
Crowdsourcing	~ „ist eine interaktive Form der Leistungserbringung, die kollaborativ oder wettbewerbsorientiert organisiert ist und eine große Anzahl extrinsisch oder intrinsisch motivierter Akteure unterschiedlichen Wissensstands unter Verwendung moderner IuK-Systeme auf Basis des Webs 2.0 einbezieht. Leistungsobjekt sind Produkte oder Dienstleistungen unterschiedlichen Innovationsgrades, welche durch das Netzwerk der Partizipierenden reaktiv aufgrund externer Anstöße oder proaktiv durch selbsttätiges Identifizieren von Bedarfslücken bzw. Opportunitäten entwickelt werden.“ [86]
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke über alle Tage eines Kalenderjahres
DTV <sub>w5</sub>	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke an den Werktagen von Montag bis Freitag außerhalb der Schulferien des jeweiligen Landes
Einflussraum	Bezeichnet das räumliche Gebiet in dem die Maßnahmen, die im Planungsraum realisiert werden, Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage haben.

Begriff	Bedeutung
ESN	Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen [45]
EVE	Empfehlungen für Verkehrserhebungen [53]
EVP	Empfehlungen für Verkehrsplanungsprozesse [56]
FCD	Als Floating Car Data (FCD) werden Daten bezeichnet, die von Fahrzeugen im Straßenverkehr erfasst werden. Im Fahrzeug wird die aktuelle Fahrzeugposition kontinuierlich mit Hilfe der Navigationssatellitensysteme erfasst, sodass die genaue Zeit-Weg-Trajektorie bekannt ist.
Fzg	Fahrzeuge
GA	Gutart
GEH	Gütemaß für die Validierung von stündlichen Verkehrsstärken; benannt nach seinem Erfinder Geoffrey E. Havers. Für weitere Informationen siehe Kapitel 8.4.1 und Anlage 1.1.
GIS	Geoinformationssystem
Güterverkehr (Güterwirtschaftsverkehr)	~ beschreibt außerbetriebliche Ortsveränderungen von Gütern aufgrund von wirtschaftlicher Aktivität. Es kann zwischen Versorgungs- und Entsorgungsverkehren unterschieden werden.
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [18]
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [55]
HH-Bef	Haushaltsbefragung (siehe Mobilitätshebung)
IHK	Industrie- und Handelskammer
IV	Individualverkehr: umfasst den Fußgängerverkehr und Verkehrsmittel, die nur von Privatpersonen oder Unternehmen genutzt werden können, die eine Verfügbarkeit auf dieses Verkehrsmittel haben. Im IV können die Verkehrsteilnehmenden den Abfahrtszeitpunkt und die Fahrroute bestimmen. Wichtige IV-Verkehrsmittel sind Rad, Krad, Pkw und Lkw.
Kalibrierung (Kalibration)	~ bezeichnet das Anpassen der Modellparameter, so dass die mit dem Modell berechneten Werte möglichst gut mit der beobachteten Realität übereinstimmen.
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
Kenngroße (Indikator)	<p>Kenngroßen beschreiben den Zustand eines Systems durch einen quantifizierbaren Kennwert. Kenngroßen in einem Verkehrsnachfragemodell beschreiben</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• das Verkehrsangebot: z.B. Netzlänge, Fahrplankilometer, Haltestellendichte</li> <li>• die Qualität des Verkehrsangebots: z.B. Reisezeit, Bedienungshäufigkeit</li> <li>• die Verkehrsnachfrage: z.B. Verkehrsaufkommen</li> </ul> <p>Kenngroßen können sich auf eine Quelle-Ziel-Relation, auf ein Netzelement, auf eine Verkehrszelle, auf einen Teilraum oder auf den gesamten Untersuchungsraum beziehen.</p>
Kenngroßenmatrix	Eine ~ enthält die Kennwerte einer Kenngroße, die den Aufwand für eine Ortsveränderung zwischen Verkehrszellen quantifizieren. Typische Aufwände sind Zeiten, Kosten und Umsteigehäufigkeiten. Kenngroßenmatrizen beschreiben so die Qualität eines Verkehrsangebots.
Kennwertmodell	<p>Ein ~ ist ein einfaches Modell, dessen Ergebnis sich aus dem Produkt einer Variable mit einem Parameter – dem sog. Kennwert – ergibt. Beispiele für Kennwertmodelle als Teil eines Verkehrsplanungsmodells sind</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissionsmodell HBEFA: Variable = Kfz-Verkehrsstärke, Kennwert = Emissionsfaktor differenziert nach Verkehrszustand und Fahrzeugart</li> <li>• Erlösmodell-ÖV: Variable = Personenkilometer, Kennwert = Erlös pro Kilometer</li> <li>• Verkehrserzeugungsmodell: Variable = Zahl der Personen, Kennwert = Wege pro Person differenziert nach Wegezweck und Personeneigenschaften</li> </ul> <p>Lohse &amp; Schnabel [111] beschreiben das ~ als Modell der Verkehrserzeugung. Das Modell bestimmt personengruppen-, Quelle-Ziel-Gruppen- und zum Teil auch modusfein die Anzahl der erzeugten und angezogenen Wege für jede Verkehrszelle unter Einhaltung bestimmter Randsummenbedingungen (hart, weich, offen). Der Kennwert ist dabei das spezifische Verkehrsaufkommen.</p>
Kfz	Kraftfahrzeug
KiD	Mobilitätsstudie „Kraftverkehr in Deutschland“ [99] (siehe Mobilitätshebungen)
Klassenanzahl	~ beschreibt die Anzahl der diskreten Klassen in einer diskreten Klasseneinteilung.
Klassenbreite	~ beschreibt den Kenngroßenwertebereich bei einer diskreten Klasseneinteilung.
Konvergenz	~ beschreibt die Annäherung an einen Gleichgewichtszustand innerhalb eines iterativen Prozesses.

Begriff	Bedeutung															
Kordonpunkt (Kordonknoten)	~ definiert im Verkehrsnetz die Grenze zwischen dem Untersuchungsraum und dem Außenraum.															
Kordonzelle	~ definiert eine Verkehrszelle an der Grenze zwischen dem Untersuchungsraum und dem Außenraum, an der externer Verkehr eingespeist wird. Alternativ kann der externe Verkehr in einer Außenzelle eingespeist werden.															
KV-Terminal	~ Umschlagspunkt für den Kombinierten Verkehr. Für weitere Informationen siehe [134].															
LAU (Local Administrative Unit)	~ beschreibt staatliche, administrative Hierarchieebenen, die auf kommunaler Ebene anzusiedeln sind. [92; 93]															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Bezeichnung</th> <th>Beschreibung allgemein</th> <th>Entsprechung in Deutschland</th> <th>Entsprechung in der Schweiz</th> <th>Entsprechung in Österreich</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LAU 1</td> <td>lokale Verwaltungseinheiten</td> <td>Verwaltungsgemeinschaften</td> <td>166 Bezirke</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>LAU 2</td> <td>teils Gemeindegliederungen</td> <td>Gemeinde und gemeindefreie Gebiete</td> <td>2.721 Gemeinden</td> <td>100 Gemeinden</td> </tr> </tbody> </table>	Bezeichnung	Beschreibung allgemein	Entsprechung in Deutschland	Entsprechung in der Schweiz	Entsprechung in Österreich	LAU 1	lokale Verwaltungseinheiten	Verwaltungsgemeinschaften	166 Bezirke	-	LAU 2	teils Gemeindegliederungen	Gemeinde und gemeindefreie Gebiete	2.721 Gemeinden	100 Gemeinden
Bezeichnung	Beschreibung allgemein	Entsprechung in Deutschland	Entsprechung in der Schweiz	Entsprechung in Österreich												
LAU 1	lokale Verwaltungseinheiten	Verwaltungsgemeinschaften	166 Bezirke	-												
LAU 2	teils Gemeindegliederungen	Gemeinde und gemeindefreie Gebiete	2.721 Gemeinden	100 Gemeinden												
Leichtverkehr	~ umfasst die Verkehrsmittel Pkw, Lieferwagen ( $\leq 3,5t$ ) und Krad															
Lkw	Lastkraftwagen															
LogSum	<p>Das Konzept der ~ ermöglicht es sequentielle Entscheidungen miteinander zu koppeln. Entscheidungen der unteren Ebene beeinflussen die Entscheidungen der oberen Ebene. So kann die Routenwahl mit der übergeordneten Moduswahl oder die Moduswahl mit der übergeordneten Zielwahl gekoppelt werden.</p> <p>Die ~ bewertet dabei die Menge der Alternativen der unteren Ebene durch die Ermittlung der Nutzensumme über alle Alternativen. Der Nutzen eines Alternativen-Menge (z.B. eines Modus oder eines Ziels) ergibt sich aus der Summe der bewerteten Nutzen aller Alternativen i. Diese Summe wird dann – bei Anwendung eines Logit-Modells – logarithmiert. Durch diese Umkehrfunktion wird der bewertete Nutzen wieder in einen unbewerteten Nutzen des gesamten Modus transformiert. Dieser Wert wird als LogSum (oder Log-Summe) bezeichnet.</p>															
MDM	MobilitätsDatenMarktplatz [21]															
MiD	Mobilität in Deutschland [91] (siehe Mobilitätserhebungen)															
MIV	Motorisierter Individualverkehr															
Mobilitätserhebung (Mobilitätsbefragung)	<p>Eine ~ liefert Kenngrößen des Mobilitätsverhaltens von Personen (siehe „Empfehlungen für Verkehrserhebungen“ (EVE) [53] bzw. deren Ergänzung „Hinweise für die Durchführung von Haushaltsbefragungen zum Mobilitätsverhalten“ [57]) oder Kenngrößen zu Ortsveränderungen des Wirtschaftsverkehrs. Sie stellt damit eine wichtige Datenquelle für Verkehrsnachfragemodelle dar. Beispiele für ~ sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mobilität in Deutschland (MiD)</li> <li>• System repräsentativer Verkehrsbefragungen bzw. Mobilität in Städten (SrV)</li> <li>• Deutsches Mobilitätspanel (MOP)</li> <li>• Kraftverkehr in Deutschland (KiD)</li> </ul> <p>~ können an verschiedenen Orten durchgeführt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• am Wohnort: Haushaltsbefragung mit Wegetagebüchern</li> <li>• am Arbeitsort: Arbeitsplatzbefragung mit Erfassung des Arbeitswegs und Wegetagebüchern für dienstliche Wege</li> <li>• im Verkehrssystem: ÖV-Fahrgastbefragung im Verkehrsmittel oder Kfz-Befragung an einem Punkt im Verkehrsnetz</li> </ul>															
Mobilitätsverhalten (Verkehrsverhalten)	<p>~ beschreibt die Ortsveränderungen einer Person. Wesentliche Eigenschaften des Mobilitätsverhaltens werden durch folgende Kenngrößen quantifiziert:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahl der Ortsveränderungen (Wegeanzahl),</li> <li>• Reisezeit und Reiseweite, differenziert nach Verkehrsmittel oder Modus.</li> </ul> <p>Beobachtetes und damit tatsächlich realisiertes Mobilitätsverhalten ist ein erforderlicher Input für die Schätzung von Modellparametern. Realisiertes Verhalten muss von Verhaltenspräferenzen unterschieden werden. Realisiertes Verhalten berücksichtigt Randbedingungen (z.B. verfügbare Verkehrsmittel, Preise), die die Personen vorfinden und bei ihrer Entscheidung berücksichtigen müssen. Verhalten verändert sich bei einer Veränderung der Randbedingungen relativ schnell, Präferenzen ändern sich aufgrund von Erfahrungen, Bildung oder kulturellen Änderungen relativ langsam. Bei der Schätzung vom Modellparametern wird versucht, alle bekannten Randbedingungen der Verhaltensentscheidungen zu berücksichtigen, sodass die Parameter nicht Verhalten sondern Präferenzen beschreiben.</p>															
Mobilitätswerkzeug	Ein ~ bezeichnet ein Fahrzeug im Privatbesitz (Pkw, Rad), eine ÖV-Zeitkarte (z.B. Jahreskarte, oder BahnCard) oder eine Berechtigung zur Nutzung eines Fahrzeuges (z.B. Mitgliedschaft in einer Sharingorganisation). Die Anschaffung des Mobilitätswerkzeugs ist mit einmaligen															

Begriff	Bedeutung																									
	Investitionskosten verbunden und das Ergebnis eines Entscheidungsprozesses, bei dem die Anschaffungskosten dem Nutzen des Besitzes gegenübergestellt werden. Die Verfügbarkeit eines bestimmten Mobilitätswerkzeug beeinflusst die Moduswahl, wenn der Modus die Verfügbarkeit des Fahrzeuges erfordert (z.B. Pkw) oder die Fahrtkosten des Modus reduziert werden.																									
Modal-Share	~ bezeichnet den Anteil eines Verkehrsmittels am Modal-Split.																									
Modal-Split	~ beschreibt die Verteilung der Anteile der Verkehrsmittel (und des Fußgängerverkehrs) am Gesamtverkehrsaufkommen, z.B. bezogen auf die Anzahl durchgeführter Ortsveränderungen oder zurückgelegter Personenkilometer. [98]																									
Modellanwender	Personen, die ein validiertes Verkehrsnachfragemodell für Fragestellungen in der Praxis oder in der Forschung für Modellrechnungen anwenden. Sie lassen die Modellarchitektur und die Modellparameter unverändert.																									
Modellersteller	Personen, die das Verkehrsnachfragemodell entwickeln. Sie erstellen das Modell so, dass es den vom Modellanwender oder dem Modellnutzer gewünschten Anforderungen entspricht. Sie kalibrieren, validieren und testen das Verkehrsnachfragemodell.																									
Modellnutzer	Personen, die die Modellergebnisse nutzen, das Modell aber nicht notwendigerweise selber bedienen.																									
Moduswahl (Verkehrsaufteilung)	Bezeichnet die dritte Stufe des Vier-Stufen-Modells. In der ~ wird die Wahl des Modus für die einzelnen Ortsveränderungen nachgebildet. Ergebnis dieses Teilmodells ist eine Nachfragematrix je Modus und Nachfragegruppe.																									
MOP	Deutsches Mobilitätspanel [80] (siehe Mobilitätsbefragungen)																									
Motorisierungsgrad (Pkw-Besitz)	~ beschreibt das Verhältnis der Anzahl der amtlich angemeldeten Kraftfahrzeuge zur Einwohnerzahl. Der Kehrwert des Motorisierungsgrades, also Einwohner pro Kraftfahrzeug, wird Motorisierungskennziffer genannt. [52] Pkw-Besitz beschreibt den ~ als Personeneigenschaft. Er kann z.B. aus Haushaltsbefragungen ermittelt werden.																									
Nachfragegruppe (Nachfragesegment, Nachfrageschicht, Nachfrageklasse)	Eine ~ beschreibt einen Teil der Nachfrage mit vergleichbarem Verhalten bei den Wahlentscheidungen. Typische ~ im Personenverkehr sind Wegezwecke, ggf. differenziert nach Personengruppen. Im Güterverkehr kann die Nachfrage nach Gutart differenziert werden. Mit Clusteranalysen kann man die Nachfrage in geeignete Gruppen unterteilen. Häufig werden aber auch Personengruppen oder Wegezwecke aus anderen Untersuchungen oder aus der Literatur übernommen (siehe zum Beispiel Lohse & Schnabel [111]). [60] Während sich der Begriff der Nachfragegruppe eignet, um die Nachfrage bei Wahlentscheidungen zu differenzieren, wird der Begriff der Verkehrsart genutzt, um die Nachfrage unabhängig von den Wahlentscheidungen zu differenzieren, z.B. in Nah- und Fernverkehr.																									
Nachfragematrix (Wegematrix, Fahrtenmatrix, Verkehrsstrommatrix)	Eine ~ enthält die Menge von Ortsveränderungen zwischen den Verkehrszellen.																									
NUTS (Nomenclature of territorial units for statistics)	~ beschreibt ein hierarchisches System zur Identifizierung und Klassifizierung der räumlichen Bezugseinheiten in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union. [72; 93; 129]																									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Bezeichnung</th> <th>Beschreibung allgemein</th> <th>Entsprechung in Deutschland</th> <th>Entsprechung in der Schweiz</th> <th>Entsprechung in Österreich</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NUTS 0</td> <td>Nationalstaaten</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>NUTS 1</td> <td>sozioökonomische Großregionen</td> <td>16 Bundesländer</td> <td>Schweiz insgesamt</td> <td>3 Gruppen von Bundesländern (Ost-, Süd- und Westösterreich)</td> </tr> <tr> <td>NUTS 2</td> <td>Grundregionen für regionalpolitische Maßnahmen</td> <td>39 Regionen (19 Regierungsbezirke, 10 ehemalige Regierungsbezirke, 9 Länder)</td> <td>7 Großregionen, zu denen die 26 Kantone zusammengefasst wurden</td> <td>9 Bundesländer</td> </tr> <tr> <td>NUTS 3</td> <td>kleine Regionen für spezifische Diagnosen</td> <td>401 Regionen, entspricht der Kreisebene (Landkreise / Kreise und kreisfreie Städte)</td> <td>26 Kantone</td> <td>35 Gruppen von Bezirken</td> </tr> </tbody> </table>	Bezeichnung	Beschreibung allgemein	Entsprechung in Deutschland	Entsprechung in der Schweiz	Entsprechung in Österreich	NUTS 0	Nationalstaaten	-	-	-	NUTS 1	sozioökonomische Großregionen	16 Bundesländer	Schweiz insgesamt	3 Gruppen von Bundesländern (Ost-, Süd- und Westösterreich)	NUTS 2	Grundregionen für regionalpolitische Maßnahmen	39 Regionen (19 Regierungsbezirke, 10 ehemalige Regierungsbezirke, 9 Länder)	7 Großregionen, zu denen die 26 Kantone zusammengefasst wurden	9 Bundesländer	NUTS 3	kleine Regionen für spezifische Diagnosen	401 Regionen, entspricht der Kreisebene (Landkreise / Kreise und kreisfreie Städte)	26 Kantone	35 Gruppen von Bezirken
Bezeichnung	Beschreibung allgemein	Entsprechung in Deutschland	Entsprechung in der Schweiz	Entsprechung in Österreich																						
NUTS 0	Nationalstaaten	-	-	-																						
NUTS 1	sozioökonomische Großregionen	16 Bundesländer	Schweiz insgesamt	3 Gruppen von Bundesländern (Ost-, Süd- und Westösterreich)																						
NUTS 2	Grundregionen für regionalpolitische Maßnahmen	39 Regionen (19 Regierungsbezirke, 10 ehemalige Regierungsbezirke, 9 Länder)	7 Großregionen, zu denen die 26 Kantone zusammengefasst wurden	9 Bundesländer																						
NUTS 3	kleine Regionen für spezifische Diagnosen	401 Regionen, entspricht der Kreisebene (Landkreise / Kreise und kreisfreie Städte)	26 Kantone	35 Gruppen von Bezirken																						
ODbL	Open Data Commons Open Database Lizenz																									
On-Demand-Angebot	Ein ~ (im verkehrlichen Kontext) beschreibt ein Verkehrsangebot ohne festen Fahrplan, welches flexibel auf die Nachfrage seiner Kunden reagiert. Wird häufig auch als Mobility as a Service (MaaS) bezeichnet.																									

Begriff	Bedeutung
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr: umfasst die Verkehrsmittel des SPNV und des ÖSPV (Bus, U-Bahn, Stadtbahn, Tram)
OSM	OpenStreetMap (OSM) ist ein Projekt, das frei nutzbare Geodaten sammelt, strukturiert und unter einer Open Data Commons Open Database Lizenz (ODbL) für die Allgemeinheit zur Verfügung stellt.
ÖSPV	Öffentlicher Straßenpersonennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr: umfasst Verkehrsmittel, die allen Bürgern zugänglich sind. Die Fahrtrouten und Abfahrtszeiten des ÖV sind in der Regel in einem Fahrplan vorgegeben.
Parameter	~ sind die Stellschrauben des Modells, mit deren Hilfe das Modell bei der Modellerstellung an die Realität angepasst wird.
Parametereinstellung	~ bezeichnet die Festlegung der Modellparameter durch eine Schätzung oder eine Setzung.
Peakspreading	~ beschreibt die Wirkung von Fahrzeitverlängerungen in der Hauptverkehrszeit auf die Abfahrtszeitwahl der Verkehrsteilnehmenden.
Personenwirtschaftsverkehr	~ beschreibt außerbetriebliche Ortsveränderungen von Personen aufgrund von wirtschaftlicher Aktivität. Es kann zwischen Dienstleistungs- und Dienstreiseverkehren unterscheiden werden.
Pkw	Personenkraftwagen
Pkw-Verfügbarkeit	~ beschreibt, ob eine Person regelmäßig oder nach Absprache Zugriff auf einen Pkw hat, den der Haushalt besitzt. Die Personeneigenschaft ~ wird in der Verkehrsnachfragemodellierung als erklärende Variable in der Moduswahl genutzt. Die ~ entspricht nicht dem Motorisierungsgrad, da sich Personen eines Haushalts ein Fahrzeug teilen können. Der Zusammenhang zwischen Motorisierungsgrad und ~ kann aus Haushaltsbefragungen abgeleitet werden.
Planfall (Szenario x, Mit-Fall)	~ beschreibt einen denkbaren Zustand zum Prognosezeitpunkt, geht dabei aber im Gegensatz zum Bezugsfall von zusätzlichen Maßnahmen oder anderen (Struktur-) Entwicklungen aus.
Planungsraum (Planungssperimeter)	~ umfasst den räumlichen Bereich, in dem die planungsauslösenden Defizite liegen und mögliche Maßnahmen ihre Wirkungen ausüben. [122]
POI	Points-of-Interest
Prognosezeitpunkt (Prognosehorizont, Betrachtungshorizonts, Planungshorizont)	~ beschreibt einen Zeitpunkt in der Zukunft. Der ~ liegt bezogen auf den Analysezeitpunkt meist zwischen 10 und 20 Jahren in der Zukunft.
RAA	Richtlinien für die Anlage von Autobahnen [49]
RAL	Richtlinien für die Anlage von Landstraßen [54]
Randsummenbedingungen der Verkehrserzeugung	In Modellen der Verkehrserzeugung wird die Anzahl der erzeugten und angezogenen Wege pro Verkehrszelle berechnet. Spezielle ~ bestimmen dabei, inwieweit diese Anzahl flexibel / elastisch ist: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wenn das Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrszellen in der Verkehrserzeugung durch die maßgebenden Siedlungsstrukturdaten direkt bestimmt werden kann und somit deren Erreichbarkeit ohne Bedeutung ist, werden <u>harte</u> (oder unelastische) ~ verwendet. Dies ist i.d.R. für Wege mit Pflichtaktivitäten der Fall.</li> <li>• Wenn das Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrszellen in der Verkehrserzeugung nur bedingt durch die maßgebenden Siedlungsstrukturdaten (im Sinne einer minimal nötigen und maximal möglichen Wegeanzahl) bestimmt werden kann und somit deren Erreichbarkeit ebenfalls in die Berechnung einfließt, werden <u>weiche</u> (oder elastische) ~ verwendet. Dies ist i.d.R. für Wege mit substituierbaren Aktivitäten der Fall.</li> <li>• Ein Sonderfall der weichen ~ sind <u>offene</u> ~. Hierbei wird durch die maßgebende Siedlungsstrukturgröße kein minimal nötiges oder maximal mögliches Verkehrsaufkommen vorgegeben, sodass die berechnete Wegeanzahl ausschließlich von der Erreichbarkeit der Siedlungsstrukturgröße abhängig ist. Dies ist i.d.R. für Freizeitwege der Fall.</li> </ul>
RASt	Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen [50]
Realitätstests	~ prüfen die Prognosefähigkeit eines Modells, in dem die Variablen des Modells verändert werden. Dazu werden das Verkehrsangebot oder die Siedlungsstrukturdaten im Analysefall in kontrollierter Weise verändert (z.B. Veränderung der Fahrzeit, der Preise oder der Einwohnerzahl). Dann wird überprüft, ob die Modellergebnisse in der erwarteten Größenordnung liegen.
Reiseweite (Wegeweite)	~ beschreibt die zurückgelegte Entfernung eines Weges einer Einzelperson.
Reisezeit	~ beschreibt die benötigte Zeit einer Einzelperson zum Zurücklegen eines Weges.

Begriff	Bedeutung
<i>(Wegezeit, Wegedauer)</i>	
Relation	Quelle-Ziel-Relation
RIN	Richtlinien für integrierte Netzgestaltung [51]
RLS-19	Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen [58]
Routenwahl <i>(Umlegung)</i>	Bezeichnet die vierte Stufe des Vier-Stufen-Modells. In der ~ werden die Routen im Verkehrsnetz ermittelt und die Nachfrage auf die Routen und damit auf die Netzelemente (Strecken, Knoten) im Verkehrsnetz verteilt. Ergebnis sind Verkehrsstärken auf den Netzelementen.
RP	Revealed-Preference Befragung: RP-Befragungen erfassen offenbarte, beobachtbare Entscheidungen.
RQ	Regelquerschnitt
RWS	Richtlinie für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen [44]
Schwerverkehr	~ umfasst die Verkehrsmittel Lkw, Lkw mit Anhänger, Sattelkraftfahrzeuge und Busse
Sensitivitätstests	~ prüfen den Einfluss der Modellparameter auf das Modellergebnis. Dabei werden die Modellvariablen – in der Regel die Modellvariablen des Analysefalls – unverändert gelassen, so dass Ergebnisänderungen auf einzelne Parameter zurückgeführt werden können.
SIB	Straßeninformationsbank oder Straßeninformationssystem
Siedlungsstrukturdaten <i>(Strukturdaten, Raumstrukturdaten)</i>	„Die räumliche Struktur ist das Ergebnis des Zusammenwirkens aller für den Zustand eines Raumes wesentlichen Faktoren, also der natürlichen und administrativen Gegebenheiten, Arbeits- und Wohnstätten, Verkehrserschließung und -bedienung sowie Erholungs- und Freizeitmöglichkeiten. Die Raumstruktur ergibt sich also aus der Gesamtheit der räumlich verankerten Lebens- und Arbeitsverhältnisse, die sich weitgehend gegenseitig bedingen und somit den Aufbau oder das Gefüge des Raumes bestimmen und beeinflussen. Die Siedlungsstruktur ergibt sich aus dem quantitativen und qualitativen Verteilungsmuster von Wohnungen, Arbeitsstätten und Infrastruktur innerhalb eines bestimmten Gebietes. Der Begriff Raumstruktur wird häufig im Zusammenhang mit dem Begriff Siedlungsstruktur als Begriffspaar „Raum- und Siedlungsstruktur“ verwendet.“ [103]
Simultane Modellstufen <i>(integrierte, kombinierte oder gekoppelte Modellstufen)</i>	~ werden im Gegensatz zu sequentiellen berechneten Modellstufen nicht einzeln und nacheinander berechnet, sondern in einem gemeinsamen Rechenschritt. Es wird in hierarchisch simultane und vollständig simultane Modellstufen unterschieden: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Für hierarchisch simultane Modelle kommen sog. Logsums oder Nested-Logit-Modelle zum Einsatz.</li> <li>• Vollständig simultane Modelle lösen ein trilineares Gleichungssystem, das die drei Wahlereignisse Quelle / Ziel / Modus abbildet. Hierfür werden spezielle Lösungsverfahren wie MULTI oder FURNESS verwendet.</li> </ul>
SP	Stated-Preference Befragung: SP-Befragungen erfassen Entscheidungen der Verkehrsteilnehmenden in hypothetischen Situationen. Das können Situationen sein, die im aktuellen Zustand für einen Befragten nur selten vorkommen (z.B. gutes ÖPNV-Angebot). Auch die Reaktion auf neue, erst in der Zukunft vorhandene Modi (z.B. App-basierte On-Demand Verkehre) kann in einer SP-Befragung ermittelt werden.
Spinne <i>(Spinnenauswertung)</i>	Eine ~ umfasst eine Teilmenge der Routen einer Nachfragegruppe. Sie kann als ein Routenfilter bezeichnet werden. Filterkriterien können dabei sein: Quellort, Zielort, überfahrene Netzelemente etc.
SPNV	Schienenpersonennahverkehr: umfasst in Deutschland das Verkehrsangebot der Verkehrsmittel Interregio-Express, Regionalexpress, Regionalbahn und S-Bahn
SQV	Scalable Quality Value; Gütemaß für die Validierung verschiedener Kenngrößen. Für weitere Informationen siehe Kapitel 8.4.1 und Anlage 1.2.
SrV	System repräsentativer Verkehrsbefragungen bzw. Mobilität in Städten [124] (siehe Mobilitätserhebungen)
Standardisierte Bewertung	Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen ÖPNV [77]
Startwartezeit	~ beschreibt den Zeitpuffer, den ein Fahrgast im ÖV zwischen Ankunft an der Starthaltestelle und der Abfahrt einplant.
Straßenfunktionsklasse <i>(Functional Road Class (FRC))</i>	~ beschreibt die Straßenklassifikation, die auf der Bedeutung der Funktion beruht, die der Straße im Straßenverkehrsnetz zukommt.
Überprüfung	~ ist ein allgemeiner Begriff für die Kontrolle von Eingangsdaten und Ergebnisdaten.
Untersuchungsraum <i>(Untersuchungsperimeter,</i>	~ umfasst den Planungsraum und den Einflussraum.

Begriff	Bedeutung
<i>Untersuchungsgebiet)</i>	
UR	Untersuchungsraum
Validierung	~ bezeichnet die Überprüfung der Modellparameter, der Modellergebnisse und des Modellverhaltens mit geeigneten Gütemaßen und Tests.
Variablen	~ eines Verkehrsnachfragemodells umfassen Größen, die sich im Laufe der Zeit verändern (z.B. Bevölkerungsstruktur oder Energiepreise) oder die durch planerische Entscheidungen (z.B. ein neues Siedlungsgebiet, eine neue Straße, eine neue ÖV-Linie, Gebühren für die Nutzung von Straßen, Parkplätzen und öffentlichen Verkehrsmitteln) gesetzt werden.
VBUS	Vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Straßen [130]
Verbindung (Zeit-Weg-Trajektorie)	~ bezeichnet eine zeitlich differenzierte Route. Während bei einer statischen Umlegung die Nachfrage auf eine Menge von räumlich unterschiedlichen Routen, deren Eigenschaften sich im Betrachtungszeitraum nicht ändern, verteilt wird, ist bei dynamischen Umlegungen neben der Route auch der Zeitpunkt der Ortsveränderung relevant.
Verifizierung	~ bezeichnet den Vorgang, bei dem eine unabhängige Person überprüft, ob zwischen Modellbesteller und Modellersteller vereinbarte Vorgaben tatsächlich umgesetzt wurden.
Verkehrsart	~ beschreibt eine Menge von Verkehrselementen mit gleichen Merkmalen [52]. Verkehrsarten eignen sich, z.B. um Verkehrsmittel (Pkw, Lkw, Bus, Bahn, etc.), Verkehrsmodi (Pkw, ÖV, Straßengüterverkehr) oder räumliche Ausprägungen (Binnen-, Quell-, Ziel-, Durchgangsverkehr oder Nah-, Fernverkehr) zu unterscheiden.
Verkehrsstärke	~ ist eine Einheit für die Anzahl der Verkehrseinheiten pro Zeiteinheit an einem bestimmten Streckenquerschnitt, z.B. Fahrzeuge / Stunde [122].
Verkehrszelle (Zelle, Zone, Bezirk)	~ beschreibt eine Raumeinheit, die den Raum gliedert.
Wirtschaftsverkehr	~ bezeichnet die Obermenge von Güterverkehr und Personenwirtschaftsverkehr. ~ beschreibt alle außerbetrieblichen Ortsveränderungen aufgrund von wirtschaftlicher Aktivität.
WZ	Wirtschaftszweig
Zählung	Mit einer ~ werden Mengen von Verkehrselementen (Personen, Fahrzeuge) im Verkehrsnetz erfasst.
Zeitraum (Zeitscheibe, Zeitintervall)	~ beschreibt eine Zeitdauer, meist in der Größenordnung von 15 Minuten bis zu mehreren Stunden oder einem Tag. In diesem Zeitraum werden Nachfrage und Angebot als konstant angenommen.
Zellenschwerpunkt	Im ~ werden – analoge der Massepunkte in der Physik – alle Raum- und Siedlungsstrukturorte (Aktivitätenorte) der jeweiligen Verkehrszelle gebündelt. ~ sind damit Start und Ziel jeder Ortsveränderung im Modell.
Zielwahl (Verkehrsverteilung)	Bezeichnet die zweite Stufe des Vier-Stufen-Modells. In der ~ werden die Quellen und die Ziele der Ortsveränderungen und somit die Ortsveränderungen zwischen den Verkehrszellen ermittelt. Ergebnis dieses Teilmodells ist eine Nachfragematrix je Nachfragegruppe.

## 13.2 Nomenklatur

In diesem Forschungsbericht werden, sofern nicht anders vermerkt, die in folgender Tabelle aufgeführten Bezeichner für Mengen, Indexe, Variablen, Matrizen und Parameter verwendet. Dabei gelten folgende Regeln:

- Mengen: Großbuchstaben.
- Indizes: Kleinbuchstaben, tiefgestellt.
- Variablen: Kleinbuchstaben, optionale Beschreibung der Variable hochgestellt, Index tiefgestellt.
- Matrizen: Großbuchstaben, optionale Beschreibung der Matrix hochgestellt, Index tiefgestellt.
- Parameter: griechische Kleinbuchstaben, optionale Beschreibung des Parameters hochgestellt, Index tiefgestellt.

Mengen und Indizes	
$g \in G$	Menge $G$ der Nachfragegruppen $g$ (Personengruppen, Wegezwecke)
$l \in L$	Menge $L$ der Linien $l$
$m \in M$	Menge $M$ der Modi $m$
$n \in N$	Menge $N$ der Knoten $n$ (nodes)
$z, o, d \in Z$	Menge $Z$ der Zellen $z$ , Quellzellen $o$ (origin) und Zielzellen $d$ (destination)
$r \in R$	Menge $R$ der Routen oder Verbindungen $r$
$s \in S$	Menge $S$ der Netzelemente $s$ (supply)
$t \in T$	Menge $T$ der Zeitintervalle $t$
Variablenbezeichner	
$b$	bewerteter Nutzen
$d$	Ortsveränderungen (demand)
$d_{god}$	Ortsveränderungen $d$ der Nachfragegruppe $g$ zwischen den Zellen $o$ und $d$ .
$d_{go}^p$	Von der Nachfragegruppe $g$ in Zelle $o$ produzierten Ortsveränderungen $d$ .
$d_{gd}^a$	Von der Nachfragegruppe $g$ in Zelle $d$ angezogene Ortsveränderungen $d$ .
$d_{od}^K, d_{od}^F, d_{od}^D$	Ortsveränderungen $d$ zwischen den Zellen $o$ und $d$ in einer Korrekturmatri- x $D^K$ , Faktormatrix $D^F$ und Differenzmatrix $D^D$ .
$p$	Wahrscheinlichkeit
$q$	Verkehrsstärke
$q^{\max}$	Kapazität
$x_k$	$k$ . Kenngröße des Verkehrsangebots. $x$ beschreibt unterschiedliche Arten von Kenngrößen (u.a. Zeiten, Kosten, Längen, Häufigkeiten).
$x_{kod}$	$k$ . Kenngröße des Verkehrsangebots zwischen Zelle $o$ und Zelle $d$ .
$t$	Zeitaufwand (time), wird immer dann anstelle des allgemeineren Bezeichners $x$ verwendet, wenn es um eine zeitliche Kenngröße geht.
$t_s^{\text{free}}$	Fahrtzeit auf Netzelement $s$ im unbelasteten Zustand
$t_s$ oder $t_s(q)$	Fahrtzeit auf Netzelement $s$ im Zustand bei Verkehrsstärke $q$
$c$	Kosten (cost), wird immer dann anstelle des allgemeineren Bezeichners $x$ verwendet, wenn es um eine monetäre Kenngröße geht.
$l$	Länge (length), wird immer dann anstelle des allgemeineren Bezeichners $x$ verwendet, wenn es um eine entfernungsbezogene Kenngröße geht.
$n$	Anzahl (number), wird immer dann anstelle des allgemeineren Bezeichners $x$ verwendet, wenn es um eine Kenngröße geht, die eine Anzahl beschreibt (Umsteigehäufigkeit, Bedienungshäufigkeit).
$v$	deterministischer Nutzen oder Geschwindigkeit
$z_{zk}$	$k$ . Siedlungsstrukturgröße in der Verkehrszelle $z$
$x_s = \frac{q_s}{q_s^{\max}}$	Auslastung eines Netzelements

Matrizen	
$D$	Nachfragematrix
$D^K, D^F, D^D$	Korrekturmatrix, Faktormatrix, Differenzmatrix
$X$	Kenngößenmatrix
Parameter	
$\beta$	allgemeiner Parameter
$\beta_{gk}^p, \beta_{gk}^a$	Produktions- bzw. Anziehungsrate der Nachfragegruppe $g$ für die $k$ . Strukturgröße.
$\beta_g^d, \beta_g^m, \beta_g^r$	Parameter Aufwandsempfindlichkeit der Nachfragegruppe $g$ bei der Ziel-, Modus- und der Routenwahl.
$\beta_1^s, \beta_2^s, \beta_k^s$	Parameter einer Capacity Restraint Funktion für eine Strecke $s$ .

## 14 Anlagen

<b>Anlage 1 Gütemaße für den Vergleich von Modellergebnissen</b>	<b>265</b>
Anlage 1.1 Zusätzliche Erläuterungen zum Gütemaß <i>GEH</i>	265
Anlage 1.2 Herleitung der Berechnungsvorschrift des Gütemaßes <i>SQV</i>	266
Anlage 1.3 Zusätzliche Erläuterungen zum Korrelationskoeffizient <i>R</i> / Bestimmtheitsmaß <i>R</i> <sup>2</sup>	270
Anlage 1.4 Zusätzliche Erläuterungen zur Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers <i>RMSE</i>	270
Anlage 1.5 Erklärungsqualitätsindikator <i>EQI</i>	271
Anlage 1.6 Konfidenzintervalle <i>AKI</i>	273
Anlage 1.7 Orientation Ratio <i>OR</i>	274
Anlage 1.8 Zusätzliche Erläuterungen zu den Lageparametern einer Verteilung	275
Anlage 1.9 Euklidische Distanz	276
Anlage 1.10 Ungleichheitskoeffizienten nach Theil	276
Anlage 1.11 Abstandsmaß nach Vortisch	278
Anlage 1.12 Statistische Tests	279
Anlage 1.13 Quell- / Zielverkehrsauswertungen	279
<b>Anlage 2 Methoden</b>	<b>281</b>
Anlage 2.1 Parameterschätzung	281
Anlage 2.2 Untersuchung von Elastizitäten	285
Anlage 2.2.1 Elastizitäten einer Bewertungsfunktion	285
Anlage 2.2.2 Elastizitäten eines Verkehrsnachfragemodells	289
Anlage 2.3 Matrixermittlung mit Randsummenbedingungen	291
Anlage 2.4 Bewertung von Verkehrsstärken und personenbezogenen Mobilitätskenngrößen unter der Berücksichtigung von Standardabweichung und Stichprobengröße	297
Anlage 2.5 Klassierung von Verteilungen	301
<b>Anlage 3 Checklisten</b>	<b>309</b>
<b>Anlage 4 Dokumentationsvorlagen</b>	<b>310</b>
<b>Anlage 5 Tool zur Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen</b>	<b>311</b>
<b>Anlage 6 Modellspezifikationsgenerator</b>	<b>312</b>
<b>Anlage 7 Vorlage einer Leistungsbeschreibung</b>	<b>316</b>

---

## Anlage 1 Gütemaße für den Vergleich von Modellergebnissen

### Anlage 1.1 Zusätzliche Erläuterungen zum Gütemaß *GEH*

Die ursprüngliche Herleitung der Berechnungsvorschrift des *GEH*-Wertes ist unbekannt. Der *GEH*-Wert kann z.B. als das geometrische Mittel aus absoluter und relativer Abweichung interpretiert werden:

- absolute Abweichung  $a$ :  $a = \sqrt{(m-c)^2}$

- relative Abweichung  $r$ :  $r = \frac{\sqrt{(m-c)^2}}{\frac{1}{2} \cdot (m+c)}$

- geometrisches Mittel:  $g_{GEH} = \sqrt{a \cdot r} = \sqrt{\sqrt{(m-c)^2} \cdot \frac{\sqrt{(m-c)^2}}{\frac{1}{2} \cdot (m+c)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (m-c)^2}{m+c}}$

mit

$c$  gemessene Kenngröße

$m$  modellierte Kenngröße

Laut einer anderen Herleitung, die von Feldman [41] vorgeschlagen wird, scheint der *GEH*-Wert zu testen, ob ein Einzelwertpaar aus einer Poisson-Verteilung stammt.

Alternativ zu einem formelbasierten Grenzwert (siehe Kapitel 8.4.1) können zulässige Abweichungen auch in tabellarischer Form angegeben werden. Diesen Weg geht z.B. ein Bericht aus dem amerikanischen National Cooperative Highway Research Programm (NCHRP Report 255 [95]). In Abbildung 14-1 sind die im NCHRP-Report vorgeschlagenen zulässigen Abweichungen einem *GEH*-Wert von 5 (Anforderung an Stundenwerte) und von 15 (denkbare Anforderung an Tageswerte) gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass der NCHRP höhere Abweichungen toleriert.

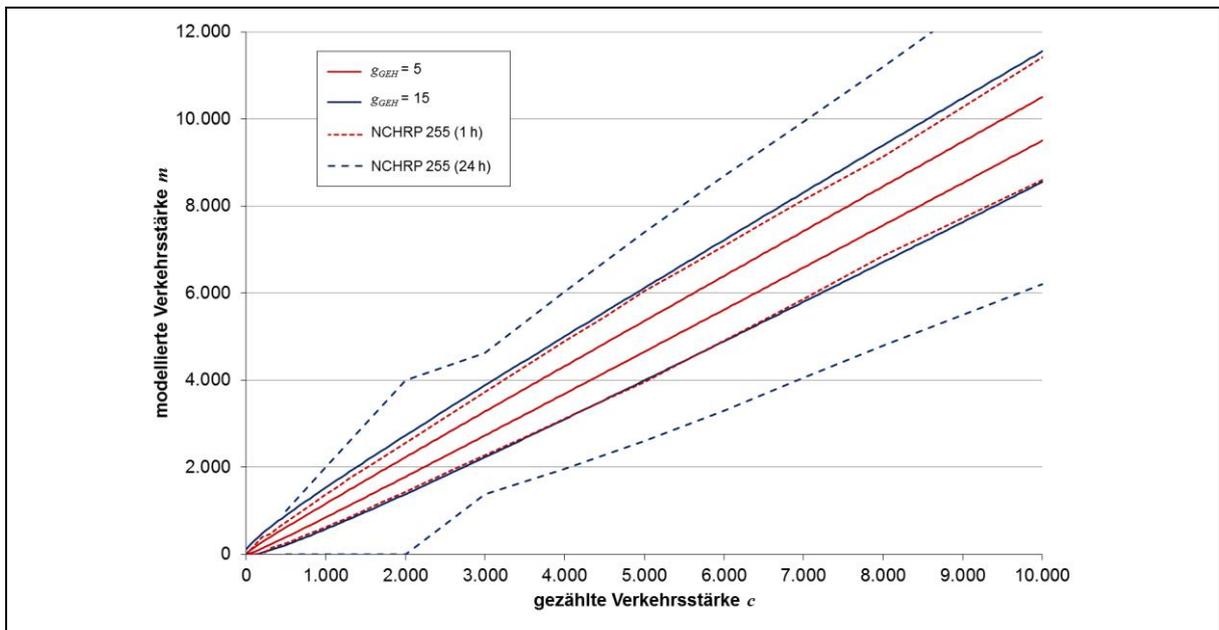


Abbildung 14-1: Gegenüberstellung der zulässigen Abweichungen des  $GEH$ -Werts und der Grenzen in NCHRP-255 [95].

## Anlage 1.2 Herleitung der Berechnungsvorschrift des Gütemaßes $SQV$

### Achsensymmetrie und Unabhängigkeit vom Modellwert

Damit der  $GEH$  die Anforderung an die Achsensymmetrie erfüllt, muss er modifiziert werden. Dieser modifizierte Wert wird im Folgenden als  $MGEH$  bezeichnet. Analog zum  $GEH$  wird der  $MGEH$  als das geometrische Mittel aus absoluter und relativer Abweichung von Messwert  $c$  und Modellwert  $m$  interpretiert. Anders als beim  $GEH$  wird die relative Abweichung aber so ermittelt, dass sie sich nur auf den Messwert bezieht:

- absolute Abweichung  $a$ : 
$$a = \sqrt{(m-c)^2}$$

- relative Abweichung beim  $GEH$ : 
$$r_{GEH} = \frac{\sqrt{(m-c)^2}}{\frac{1}{2} \cdot (m+c)} = \frac{2 \cdot a}{m+c}$$

- relative Abweichung beim  $MGEH$ : 
$$r_{MGEH} = \frac{a}{c}$$

- geometrisches Mittel (=  $GEH$ ): 
$$g_{GEH} = \sqrt{a \cdot r} = \sqrt{\sqrt{(m-c)^2} \cdot \frac{\sqrt{(m-c)^2}}{\frac{1}{2} \cdot (m+c)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (m-c)^2}{m+c}}$$

Damit ergeben sich die beiden Gütemaße  $GEH$  und  $MGEH$ :

$$g_{GEH} = \sqrt{a \cdot r_{GEH}} = \sqrt{\sqrt{(m-c)^2} \cdot \frac{\sqrt{(m-c)^2}}{\frac{1}{2} \cdot (m+c)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (m-c)^2}{m+c}}$$

$$g_{MGEH} = \sqrt{a \cdot r_{MGEH}} = \sqrt{a \cdot \frac{a}{c}} = \sqrt{\frac{a^2}{c}} = \sqrt{\frac{(m-c)^2}{c}}$$

mit

$c$  gemessene Kenngröße

$m$  modellierte Kenngröße

### Skalierbarkeit

Da Messwerte der gleichen Größenordnung (z.B. eine gezählte Verkehrsstärke  $c = 1.000$ ) abhängig vom Bezugszeitraum (Stunde oder Tag) unterschiedlich bewertet werden sollen, muss ein selbstskalierendes Gütemaß gefunden werden. Deshalb wird der  $MGEH$ -Wert um einen Skalierungsfaktor  $f$  erweitert. Ergebnis ist ein skaliertes  $GEH$ , der im Folgenden als  $SGEH$  bezeichnet wird:

$$g_{SGEH} = \sqrt{\frac{a^2}{f \cdot c}}$$

Wird der Skalierungsfaktor für stündliche ( $f = 1.000$ ) und tägliche ( $f = 10.000$ ) Verkehrsstärken herangezogen, ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$g_{SGEH} = \sqrt{\frac{a_{hour}^2}{1.000 \cdot c_{hour}}} = 0,0316 \cdot \sqrt{\frac{a_{hour}^2}{c_{hour}}} = 0,0316 \cdot g_{MGEH, hour}$$

$$g_{SGEH} = \sqrt{\frac{a_{day}^2}{10.000 \cdot c_{day}}} = 0,01 \cdot \sqrt{\frac{a_{day}^2}{c_{day}}} = 0,01 \cdot g_{MGEH, day}$$

$$g_{SGEH} = 0,01 \cdot g_{MGEH, day} = 0,0316 \cdot g_{MGEH, hour}$$

$$\Rightarrow g_{MGEH, day} = 3,16 \cdot g_{MGEH, hour}$$

Daraus lässt sich ableiten, dass der  $GEH$ -Sollwert von 5 für die Validierung stündlicher Verkehrsstärken einem  $GEH$ -Sollwert von etwa 16 ( $3,16 \cdot 5 \approx 16$ ) für die Validierung tägliche Verkehrsstärken entspricht.

### Wertebereich 0 bis 1

Um den  $MGEH$ -Wert in den Wertebereich von 0 (keine Übereinstimmung) bis 1 (perfekte Übereinstimmung) zu transformieren, wird folgende Funktionsform gewählt und als Scalable Quality Value ( $SQV$ ) bezeichnet:

$$g_{SQV} = \frac{1}{1 + g_{GEH}} = \frac{1}{1 + \frac{g_{MGEH}}{\sqrt{f}}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{a^2}{f \cdot c}}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(m-c)^2}{f \cdot c}}}$$

Um die maximal zulässige absolute Abweichung  $a$  von einem Zählwert  $c$  zu ermitteln, wird die Funktion nach  $a$  aufgelöst. Es ergibt sich eine quadratische Gleichung mit zwei Lösungen, von denen  $a_1$  positive Werte liefert:

$$a_1 = \frac{(1 - g_{SQV}) \sqrt{f} \sqrt{c}}{g_{SQV}}$$

$$a_2 = -\frac{(1 - g_{SQV}) \sqrt{f} \sqrt{c}}{g_{SQV}}$$

#### Vergleich von $GEH$ , $MGEH$ und $SQV$

Im direkten Vergleich liefert der  $MGEH$  einen etwas höheren Wert als der  $GEH$ . Bei einem Messwert von 1.000 ergibt sich ein Unterschied von etwa 4%, ein  $GEH = 5$  entspricht dann einem  $MGEH$  von 5,2. Bei einem Messwert von 4.000 reduziert sich der Unterschied auf 2%.

Der  $MGEH$ -Wert und der  $SQV$  liefern die gleichen Beurteilungen. Sie können durch folgenden Zusammenhang umgerechnet werden.

$$g_{MGEH} = \frac{(1 - g_{SQV}) \sqrt{f}}{g_{SQV}}$$

$$g_{SQV} = \frac{1}{1 + \frac{g_{MGEH}}{\sqrt{f}}}$$

Tabelle 14-1 zeigt eine Gegenüberstellung ausgewählter Werte.

$g_{MGEH}$	$g_{SQV}$	$f$
5	0,8635	1.000
10	0,7597	1.000
15	0,6783	1.000

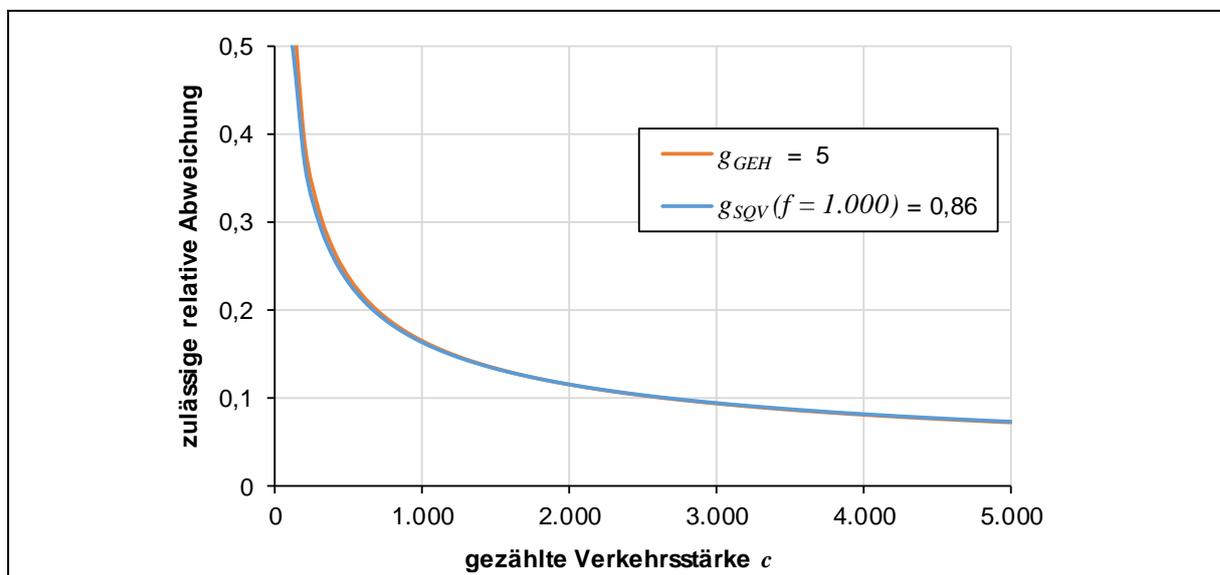
Tabelle 14-1: Umrechnung von  $MGEH$  in  $SQV$ .

Eine Umrechnung zwischen  $GEH$ -Wert und  $SQV$ -Wert analog der obigen Umrechnung zwischen  $MGEH$ -Wert und  $SQV$ -Wert ist aufgrund der Einführung der Spiegelsymmetrie nicht mit einer so simplen Formel möglich. Tabelle 14-2 stellt verschiedene  $GEH$ -Werte (bei einer gezählten Verkehrsstärke von 1.000 Fahrzeugen pro Stunde) und die entsprechenden  $SQV$ -Werte (mit jeweils verschiedenen Skalierungsfaktoren) tabellarisch gegenüber.

$g_{GEH}(c = 1.000)$	$g_{SQV}(f = 1)$	$g_{SQV}(f = 10)$	$g_{SQV}(f = 100)$	$g_{SQV}(f = 1.000)$	$g_{SQV}(f = 10.000)$
0,2	0,83	0,94	0,98	0,99	1,00
0,5	0,74	0,87	0,95	0,98	1,00
1,0	0,63	0,77	0,91	0,97	0,99
2,5	0,28	0,55	0,80	0,93	0,98
5,0	0,16	0,38	0,66	0,86	0,95
7,5	0,11	0,28	0,56	0,80	0,93
10,0	0,08	0,23	0,48	0,75	0,90
12,5	0,07	0,19	0,42	0,70	0,88
15,0	0,06	0,16	0,37	0,65	0,86

Tabelle 14-2: Vergleich der Gütemaße *GEH* und *SQV*.

Nichtsdestotrotz folgt der Verlauf des zulässigen relativen Fehlers zwischen Modellwert  $m$  und Erhebungswert  $c$  für *GEH*-Wert und *SQV*-Wert einer fast identischen Funktionsform (siehe Abbildung 14-2).

Abbildung 14-2: Vergleich der zulässigen relativen Abweichung der Gütemaße *GEH* und *SQV* (bei  $f = 1.000$ )<sup>38</sup>.

<sup>38</sup> Der verwendete *SQV*-Wert von 0,86 ergibt sich aus Tabelle 14-2 (siehe Anlage 1.2) bei  $GEH = 5$  und einem Skalierungsfaktor für stündliche Verkehrsstärken  $f = 1.000$ . Er entspricht damit nahezu einem  $GEH = 5$ , die geringen Abweichungen ergeben sich aus der Einführung der Eigenschaft der Spiegelsymmetrie.

### Anlage 1.3      **Zusätzliche Erläuterungen zum Korrelationskoeffizient $R$ / Bestimmtheitsmaß $R^2$**

Das Bestimmtheitsmaß trifft keine Aussage über die Streuung der Daten. Zusätzlich zum Bestimmtheitsmaß bietet es sich an, eine lineare Regressionsfunktion zu bestimmen. Die Steigung der Regressionsgeraden, die zwar auch keine Aussage zur Streuung liefert, aber ein eigenes Qualitätsmaß für die Übereinstimmung der modellierten und erhobenen Daten darstellt, sollte laut WebTAG (Unit 3.1) [33] für Verkehrszellenwerte zwischen 0,98 und 1,02 liegen.

Für die Geradensteigung ist es allerdings entscheidend, ob der Schnittpunkt zwischen Gerade und Koordinatenursprung erzwungen wird. Die Steigung und das Bestimmtheitsmaß weisen bei einem erzwungenen Schnittpunkt auf eventuelle systematische Fehler hin (z.B. die Modellwerte sind immer zu groß), allerdings geht durch dieses Erzwingen auch ein zusätzliches Qualitätsmaß, der Ordinaten Schnittpunkt, verloren. Idealerweise sollte der (nicht erzwungene) Schnittpunkt von Regressionsgerade und Ordinate nahe dem Koordinatenursprung liegen.

### Anlage 1.4      **Zusätzliche Erläuterungen zur Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers $RMSE$**

Der Wert der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers ist unter verschiedenen Bezeichnungen und Akronymen geläufig, die an dieser Stelle kurz aufgeführt werden sollen, um auf die unterschiedlichen Definitionen aufmerksam zu machen:

- Sammer et al. [109] verwenden den Begriff der Wurzel der mittleren Abweichungsquadrate, wobei sie hierbei noch die „absolute Wurzel der mittleren Abweichungsquadrate“ (*AWA*) und die „prozentuale Wurzel der mittleren Abweichungsquadrate“ (*PWA*) unterscheiden. Um zu berücksichtigen, dass verschiedene Zählstellen eine unterschiedliche Genauigkeit aufweisen, stellen Sammer et al. [109] eine zusätzliche Variante der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers vor, die eine Genauigkeitsgewichtung vornimmt.
- In den Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation [47] wird die prozentuale Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers als „Root Mean Squared Percent Error“ (*RMSPE*) verwendet. Sie entspricht der Berechnungsformel des *PWA* und stellt die Größe des Fehlers relativ zum Mittelwert dar.
- Die englischen und amerikanischen Richtlinien (z.B. Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual [26]) sprechen vom „Root Mean Squared Error“ (*RMSE*) bzw. von dessen prozentualer Form, dem „Percent Root Mean Squared Error“ (*%RMSE*). Während der *RMSE* und die österreichischen *AWA* eine identische Berechnungsvorschrift aufweisen, weichen die Formel des *%RMSE* und des österreichischen *PWA* (bzw. des deutschen *RMSPE*) voneinander ab.

Die *PWA* (bzw. der *RMSPE*) berechnen sich im Gegensatz zum *%RMSE* (siehe Kapitel 8.4.2) auf folgende Weise:

$$PWA = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \left( \frac{x_n - y_n}{y_n} \right)^2}{N}} \cdot 100\%$$

mit

$N$  Anzahl der Einzelwerte

$x_n$  bzw.  $y_n$   $n$ . Messwert bzw. Modellwert

### Anlage 1.5 Erklärungsqualitätsindikator *EQI*

Der Erklärungsqualitätsindikator (*EQI*) wird von Sammer et al [109] vorgestellt und stellt ein Maß der Abbildungsqualität zwischen modellierten und erhobenen Verkehrsstärken im betrachteten Streckennetz des Untersuchungsraum dar. Er gibt den Anteil der Streuung an, der durch die modellierten Verkehrsstärken in Relation zu zufallsverteilten Verkehrsstärken erklärt werden kann. Dafür setzt er die Streuung der Modellwerte um die Erhebungswerte ins Verhältnis zu einer zufallsverteilten Streuung<sup>39</sup> um die Erhebungswerte um den Mittelwert. Eine Auswertung ist modus- bzw. verkehrsmittelfein möglich. Unter der Voraussetzung einer repräsentativen Erhebungsgrundlage können auch Quell- und Zielverkehrsaufkommen oder einzelne Quelle-Ziel-Beziehungen mit dem *EQI* bewertet werden.

Der einheitenlose *EQI* nimmt Werte zwischen 0 (keine Erklärungsqualität – die Verkehrsstärken sind komplett zufällig) und 1 (komplette Erklärungsqualität – die Verkehrsstärken sind komplett mit dem Wirkungsmodell zu erklären) an<sup>40</sup>. Als Zielwert kann laut Sammer et al. [109] ein *EQI* von über 0,85 angenommen werden, wobei der erreichte *EQI* immer von diversen Faktoren abhängig ist, z.B. von der Qualität der Kalibrierung oder der Qualität der Verhaltensdaten.

Der *EQI* wird in zwei Varianten vorgeschlagen:

- dem ungewichteten  $EQI_u$  und
- dem gewichteten  $EQI_g$ .

Der  $EQI_u$  setzt dabei voraus, dass die ausgewählten Zählstellen sowie deren Streckenabschnitte repräsentativ für das reale Streckennetz sind. Diese Annahme ist jedoch nur selten gegeben. Damit die Verkehrsstärken der Zählstellen dennoch repräsentativ für das reale Streckennetz sind, werden die Verkehrsstärkekassen beim  $EQI_g$  mit den Streckenlängen  $l_s$  gewichtet. Aus diesem Grund ist der  $EQI_g$  zu bevorzugen.[109]

<sup>39</sup> Zufallsverteilte Streuung bedeutet, dass anstelle von Modellwerten zufällig gezogene Erhebungswerte genutzt werden.

<sup>40</sup> Diese Grenzen gelten jedoch nur, wenn  $s_x \geq s_y$  (bzw.  $s_{x,g} \geq s_{y,g}$ ) gilt. Darüber hinaus ist zu beachten, dass der *EQI* größer wird, wenn sich die zufällige Streuung  $s_x$  und die Streuung aus Modell- und Erhebungswert  $s_y$  (bzw.  $s_{x,g}$  und  $s_{y,g}$ ) stark unterscheiden und dass er gegen Null strebt, je ähnlicher die Streuungen sind.

$$EQI_u = \frac{s_x^2 - s_y^2}{s_x^2} = 1 - \frac{s_y^2}{s_x^2}$$

$$EQI_g = \frac{s_{x,g}^2 - s_{y,g}^2}{s_{x,g}^2} = 1 - \frac{s_{y,g}^2}{s_{x,g}^2}$$

mit

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - y_n)^2}{N-1}}, \quad s_x = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad \bar{x} = \frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N},$$

$$s_{y,g} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (g_k \cdot (x_{n,k} - y_{n,k})^2)}{\sum_{k=1}^K (g_k) - 1}}, \quad s_{x,g} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (g_k \cdot (x_{n,k} - \bar{x}_g)^2)}{\sum_{k=1}^K (g_k) - 1}},$$

$$g_k = \frac{\sum_{s \in S} y_s \cdot l_s}{\sum_{s \in k \cap S_Z} y_s \cdot l_s}, \quad \bar{x}_g = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (g_k \cdot x_{n,k})}{\sum_{k=1}^K (g_k)} \quad \text{sowie}$$

$N$  Anzahl der betrachteten Zählstellen bzw. Strecken

$x_n$  bzw.  $y_n$   $n$ . Messwert bzw. Modellwert

$\bar{x}$  erhobener Mittelwert

$s_y$  Standardabweichung der absoluten Differenz zwischen den modellierten Verkehrsstärken  $y$  und den erhobenen Verkehrsstärken  $x$

$s_x$  Standardabweichung der absoluten Differenz zwischen dem erhobenen Mittelwert  $\bar{x}$  und den erhobenen Verkehrsstärken  $x$

$K$  Anzahl der Verkehrsstärkeklassen

$s_{y,g}$  gewichtete Standardabweichung der absoluten Differenz zwischen den modellierten Verkehrsstärken  $y$  und den erhobenen Verkehrsstärken  $x$

$s_{x,g}$  gewichtete Standardabweichung der absoluten Differenz zwischen dem erhobenen, gewichteten Mittelwert  $\bar{x}_g$  und den erhobenen Verkehrsstärken  $x$

$g_k$  längenabhängiges Gewicht der Klasse  $k$

$y_s$	modellierte Verkehrsstärke der Strecke $s$
$l_s$	Länge der Strecke $s$
$s \in \mathcal{S}$	Strecke $s$ aus der Menge aller Strecken $\mathcal{S}$
$s \in k \cap \mathcal{S}_z$	Strecke $s$ aus der Teilmenge der Strecken mit Zählstelle $\mathcal{S}_z$ in der Klasse $k$

### Anlage 1.6 Konfidenzintervalle *AKI*

Sammer et al. [109] schlagen im Richtlinienentwurf QUALIVERMO Konfidenzintervalle vor, die angeben, in welchem Wertebereich ein modellierter Erwartungswert in der Prognose streuen kann. Das Konfidenzintervall der Prognose errechnet sich aus einer multiplikativen Verknüpfung einer statistischen Sicherheit<sup>41</sup> und der Standardabweichung des Analysefalls. Als Standardabweichung wird im Falle von streckenbezogenen Verkehrsstärken die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers über eine Gruppe von Zählstellen angenommen. Folgende Formel zeigt die Berechnung des absoluten Konfidenzintervalls *AKI* für den Bestandsfall:

$$AKI = 1,96 \cdot RMSE$$

mit

*AKI*            absoluten Konfidenzintervalls einer Gruppe von Zählstellen  
[Verkehrsstärkemengeneinheit / Zeiteinheit]

*RMSE*        absolute Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers einer Gruppe von Zählstellen  
[Verkehrsstärkemengeneinheit / Zeiteinheit]

Die vorgestellte Berechnung der Konfidenzintervalle kann um Unsicherheitsfaktoren für verschiedene Zählstellenqualitäten oder Schwankungsbreiten aus verschiedenen Szenarien erweitert werden. Darüber hinaus ist die Berechnung eines relativen Konfidenzintervalls möglich. [109]

---

<sup>41</sup> Eine angenommene Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% führt zu einem Faktor von 1,96.

### Anlage 1.7 Orientation Ratio *OR*

Im Travel Model Validation And Reasonableness Checking Manual [26] wird der sogenannte Orientation Ratio (*OR*) vorgestellt. Dieser Wert wird auf Matrixebene berechnet und vergleicht Quelle-Ziel-Muster. Er gibt das Ausmaß an, in dem sich der Verkehr einer Quellzelle *o* auf eine Zielzelle *d* orientiert, bezogen auf den gesamten Verkehr aus der Quellzelle *o* (in alle Zielzellen).

$$OR = \frac{d_{od} \cdot \sum_o \sum_d (d_{od})}{\sum_o (d_{od}) \cdot \sum_d (d_{od})}$$

mit

$d_{od}$  Wege von Quelle *o* nach Ziel *d*

Ein  $OR < 1$  bedeutet, dass sich die Quellzelle *o* weniger auf die Zielzelle *d* orientiert als auf die Gesamtregion (z.B. die Orientierung der Wege einer Zelle mit niedrigem Durchschnittseinkommen bezogen auf eine Zelle mit hochpreisigen Einkaufszentren). Entgegengesetzt bedeutet ein Orientation Ratio größer als 1, dass sich die Quellzelle *o* stärker auf die Zielzelle *d* konzentriert als auf die Gesamtregion. [26]

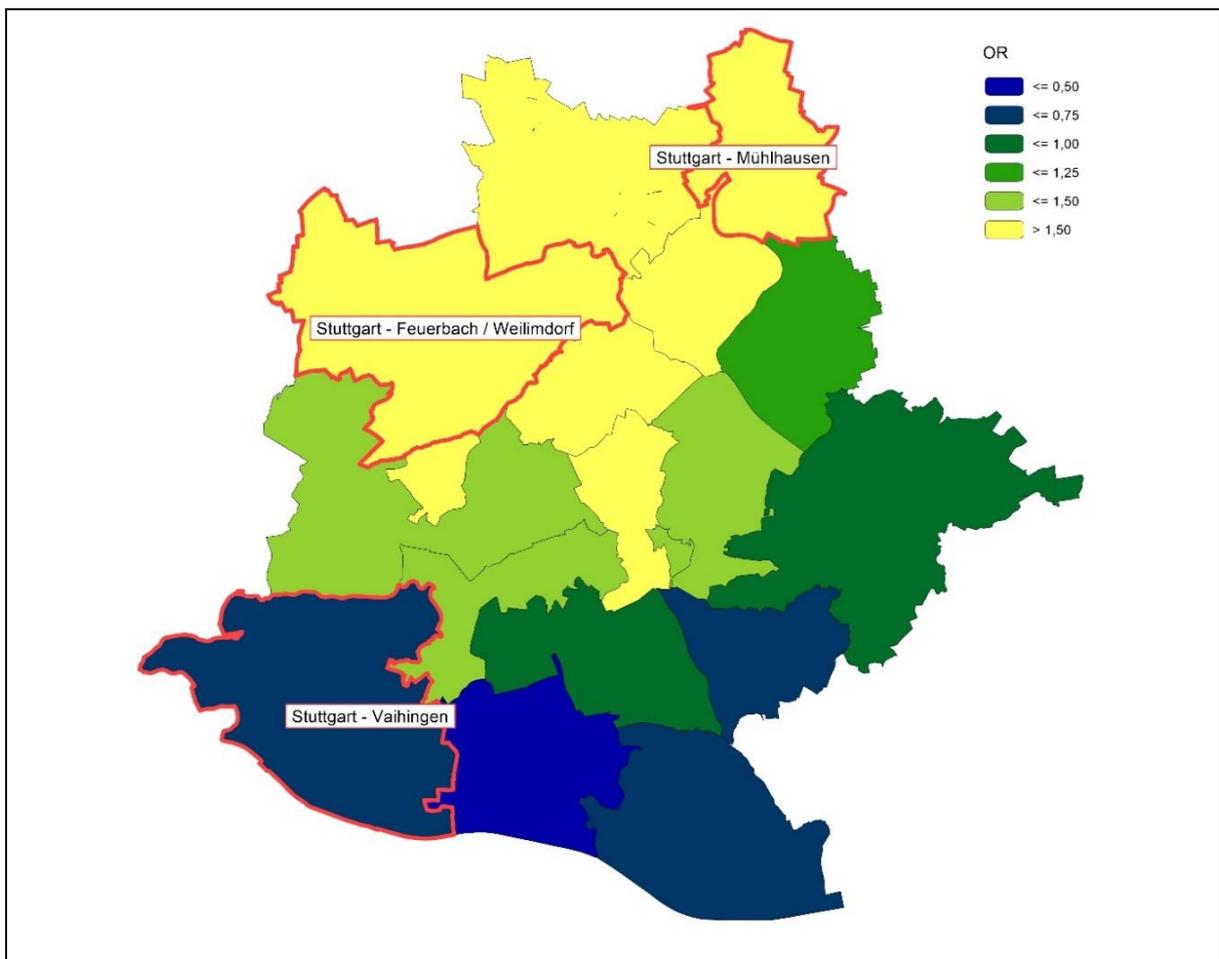


Abbildung 14-3: Orientation Ratio des Zielstadtbezirks Stuttgart-Feuerbach / Weilmendorf.

Abbildung 14-3 stellt dies beispielhaft für einen ausgewählten Zielstadtbezirk (Stuttgart-Feuerbach / Weilimdorf) des Verkehrsmodells des Verbands Region Stuttgart dar. Es ist zu erkennen, dass sich die blauen Zellen (z.B. Stuttgart-Vaihingen) weniger stark auf die Zielzelle konzentrieren (im Vergleich zu allen Zellen). Die gelben Zellen (z.B. Stuttgart-Mühlhausen) haben hingegen einen größeren Fokus auf Stuttgart-Feuerbach / Weilimdorf.

Der Orientation Ratio eignet sich auch als Vergleichsgröße. Der Vergleich kann dann entweder durch Subtraktion (gute Übereinstimmung bei  $OR_1 - OR_2 \rightarrow 0$ ) oder Division (gute Übereinstimmung bei  $OR_1 / OR_2 \rightarrow 1$ ) erfolgen.

### Anlage 1.8 Zusätzliche Erläuterungen zu den Lageparametern einer Verteilung

Zusätzlich zu den Lageparametern, die in Kapitel 8.4.3 erläutert werden, können folgende Verteilungscharakteristika ausgewiesen werden:

- Größe der Stichprobe bzw. der Grundgesamtheit  $N$
- Variationskoeffizient der Verteilung

$$V_m = \frac{S_m}{\bar{m}}$$

- Schiefe der Verteilung

$$Sch_m = \frac{\sum_{k=1}^K x_k \cdot (m_k - \bar{m})^3}{(N-1)} \sqrt{\left( \frac{\sum_{k=1}^K x_k \cdot (m_k - \bar{m})^2}{(N-1)} \right)^3}$$

- ausgewählte Quantile der Verteilung, z.B.  $Q_{0,05}$ ,  $Q_{0,15}$ ,  $Q_{0,25}$ ,  $Q_{0,5}$ ,  $Q_{0,75}$ ,  $Q_{0,85}$ ,  $Q_{0,95}$

mit

$m_k$  Klassenmitte  $m$  der Klasse  $k$

$x_k$  absolute Häufigkeit  $x$  in der Klasse  $k$

$K$  Klassenanzahl

$N$  Anzahl der Einzelwerte

$Q_i$  Quantil  $i$

### Anlage 1.9 Euklidische Distanz

Die euklidische Distanz  $d(x, y)$  als Sonderform der Minkowski-Metrik betrachtet die Summe der quadrierten Abweichungen über alle Verteilungsklassen. Um vergleichbare Merkmalsmaßeinheiten aufzuweisen, empfiehlt sich eine Standardisierung der Verteilungen. Damit lässt sich zudem die Frage umgehen, ob mit absoluten oder relativen Häufigkeiten gerechnet werden soll. [5]

$$d = \sqrt{\sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}$$

Für die Standardisierung der Daten ist  $x_k$  mit  $\tilde{x}_k$  zu ersetzen ( $y_k$  analog), wobei gilt:

$$\tilde{x}_k = \frac{x_k - \bar{x}}{s_x}$$

mit

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K x_k \quad \text{und} \quad s_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^K (x_k - \bar{x})^2} \quad \text{sowie:}$$

$K$  Klassenanzahl

$x_k$  bzw.  $y_k$  (absolute oder relative) Häufigkeit in der Klasse  $k$

$\tilde{x}_k$  bzw.  $\tilde{y}_k$  normierte Häufigkeit in der Klasse  $k$

$\bar{x}$  Klassenmittelwert

$s_x$  Standardabweichung

### Anlage 1.10 Ungleichheitskoeffizienten nach Theil

Der Ungleichheitskoeffizient nach Theil überprüft die Übereinstimmung zweier Verteilungen. Unglücklicherweise wurden zwei gleichnamige Indikatoren  $U_1$  und  $U_2$  entwickelt. Daneben gibt es noch drei weitere Fehleranteile, mit denen sich die Abweichungen zwischen den Verteilungen genauer analysieren lassen. [1; 11; 47]

- Der Ungleichheitskoeffizient  $U_1$  hat einen Wertebereich von 0 bis 1, wobei  $U_1 = 0$  eine perfekte Übereinstimmung und  $U_1 = 1$  die schlechteste Übereinstimmung anzeigt. Die schlechteste Übereinstimmung tritt ein, wenn entweder eine negative Proportionalität zwischen  $x_k$  oder  $y_k$  besteht oder wenn alle  $x_k$  bzw.  $y_k$  gleich Null sind. Da alle Verteilungen besser bewertet werden als eine Verteilung mit  $y_k = 0$  (naive Prognose), ist  $U_1$  nicht eindeutig interpretierbar.  $U_1$  sollte daher nicht verwendet werden. [1; 11]

$$U_1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}}{\sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k)^2} + \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (y_k)^2}}$$

- Der Ungleichheitskoeffizient  $U_2$  hat einen Wertebereich von 0 bis  $\infty$ , wobei  $U_2 = 0$  eine perfekte Übereinstimmung anzeigt. Bei  $U_2 = 1$  hat die  $y_k$ -Verteilung die gleiche Güte wie eine naive Prognose. Demzufolge deutet  $U_2 > 1$  darauf hin, dass die  $y_k$ -Verteilung schlechter zu bewerten ist, da selbst eine naive Prognose besser bewertet wird.  $U_2$  ist  $U_1$  immer vorzuziehen. [1; 11]

$$U_2 = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (x_k)^2}}$$

- Der Verzerrungsanteil  $U^M$  gibt den Anteil des mittleren quadratischen Fehlers an, der aus einer Ungleichheit der Mittelwerte kommt, die wiederum aus einer systematischen Über- oder Unterschätzung resultiert. Eine gute Übereinstimmung ist erreicht, wenn  $U^M = 0$  gilt. [47]

$$U^M = \frac{(\bar{x} - \bar{y})^2}{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}$$

- Der Nicht-Effizienz Anteil  $U^S$  betrachtet systematische Unterschiede in der Varianz. Eine gute Übereinstimmung ist erreicht, wenn  $U^S = 0$  gilt. [47]

$$U^S = \frac{(s_x - s_y)^2}{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}$$

- Der Kovarianzanteil  $U^C$  beschreibt das Fehlen eines linearen Zusammenhanges zwischen den beiden Messreihen. Er misst damit unsystematische, zufällige Fehler. Eine gute Übereinstimmung ist erreicht, wenn  $U^C = 1$  gilt. [47]

$$U^C = \frac{2 \cdot (1 - R) \cdot s_x \cdot s_y}{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (x_k - y_k)^2}$$

mit

$K$                       Klassenanzahl

$x_k$ bzw. $y_k$	Häufigkeit in der Klasse $k$ , bei $U_2(x, y)$ explizit relative Häufigkeiten [11]
$\bar{x}$ bzw. $\bar{y}$	Klassenmittelwert der Verteilung $x$ bzw. $y$
$s_x$ bzw. $s_y$	Standardabweichung der Verteilung $x$ bzw. $y$
$R$	Korrelationskoeffizient

### Anlage 1.11 Abstandsmaß nach Vortisch

Das Abstandsmaß nach Vortisch [131] berücksichtigt die Ähnlichkeit in Form und Lage zweier Verteilungen. Für die Berechnung sind absolute Häufigkeiten heranzuziehen. Die Ähnlichkeit der Form der Verteilungen  $x$  und  $y$  wird mathematisch durch den Korrelationskoeffizienten  $R$  ausgedrückt. Hierbei sind folgende Sonderfälle zu beachten:

- Eine der beiden Verteilungen ist konstant:  $R = 0$ .
- Beide Verteilungen sind konstant:  $R = 1$ .

Die Lageähnlichkeit wird durch folgende Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$\theta = \frac{1}{|D(x, y)|} \cdot \sum_{k=1}^K \frac{\min\{x_k, y_k\}}{\max\{x_k, y_k\}}$$

Auch hier gilt es folgende Sonderfälle zu beachten:

- Wenn  $x_k = y_k = 0$ , dann gilt  $\theta = 1$ .
- Wenn  $|D(x, y)| = 0$ , dann gilt  $\theta = 0$ .

Zusätzlich zur Lage- und Formähnlichkeit wird die Überlappung der Definitionsbereiche berücksichtigt:

$$\sigma = \frac{|D(x, y)|}{|D(x) \cup D(y)|}$$

Abschließend werden die erläuterten Einzelbestandteile zu einem allgemeinen Abstandsmaß  $\Delta$  zusammengeführt

$$\Delta = 1 - (\alpha \cdot R + (1 - \alpha) \cdot \theta) \cdot (\gamma \cdot \sigma + (1 - \gamma) \cdot 1)$$

Mithilfe der Parameter  $\alpha$  und  $\gamma$  kann der Form-, Lage- und Definitionsbereichseinfluss reguliert werden. Vortisch [131] empfiehlt standardmäßig  $\alpha = \gamma = 0,5$ . Bei vollkommener Übereinstimmung der Verteilungen ergibt sich  $\Delta = 0$  und bei komplett abweichenden Verteilungen  $\Delta = 1$ .

mit

$K$  Klassenanzahl

$x_k$ bzw. $y_k$	Häufigkeit in der Klasse $k$
$D(x, y)$	gemeinsamer Definitionsbereich von $x$ und $y$
$D(x)$	Definitionsbereich von $x$
$D(y)$	Definitionsbereich von $y$
$\alpha$	Parameter für den Form- und Lageeinfluss $\in [0;1]$
$\gamma$	Parameter für den Definitionsbereichseinfluss $\in [0;1]$

### Anlage 1.12 Statistische Tests

Statistische Tests, wie der Kolmogorov-Smirnoff-Test, eignen sich nur bedingt zum Verteilungsvergleich, da das zu ermittelnde Prüfkriterium aufgrund der meist sehr großen Stichprobengröße – ein Modell repräsentiert eine Vollerhebung – sehr streng wird. Zudem wird beim Kolmogorov-Smirnoff-Test nur die Lage der relativen Häufigkeiten beurteilt und nicht die Lage der absoluten Häufigkeiten.

### Anlage 1.13 Quell- / Zielverkehrsauswertungen

Folgende ggf. als unkonventionell empfundene Darstellungsmöglichkeiten werden von Hollander [74] zur visuellen Überprüfung der Modellergebnisse empfohlen:

- Darstellung des Quell- oder Zielverkehrs aller Zellen bezogen auf eine Ziel- oder Quellzelle mittels Zelleneinfärbung (beispielhaft dargestellt für ausgewählte Stadtbezirke des Verkehrsmodells des Verbands Region Stuttgart in Abbildung 14-4).

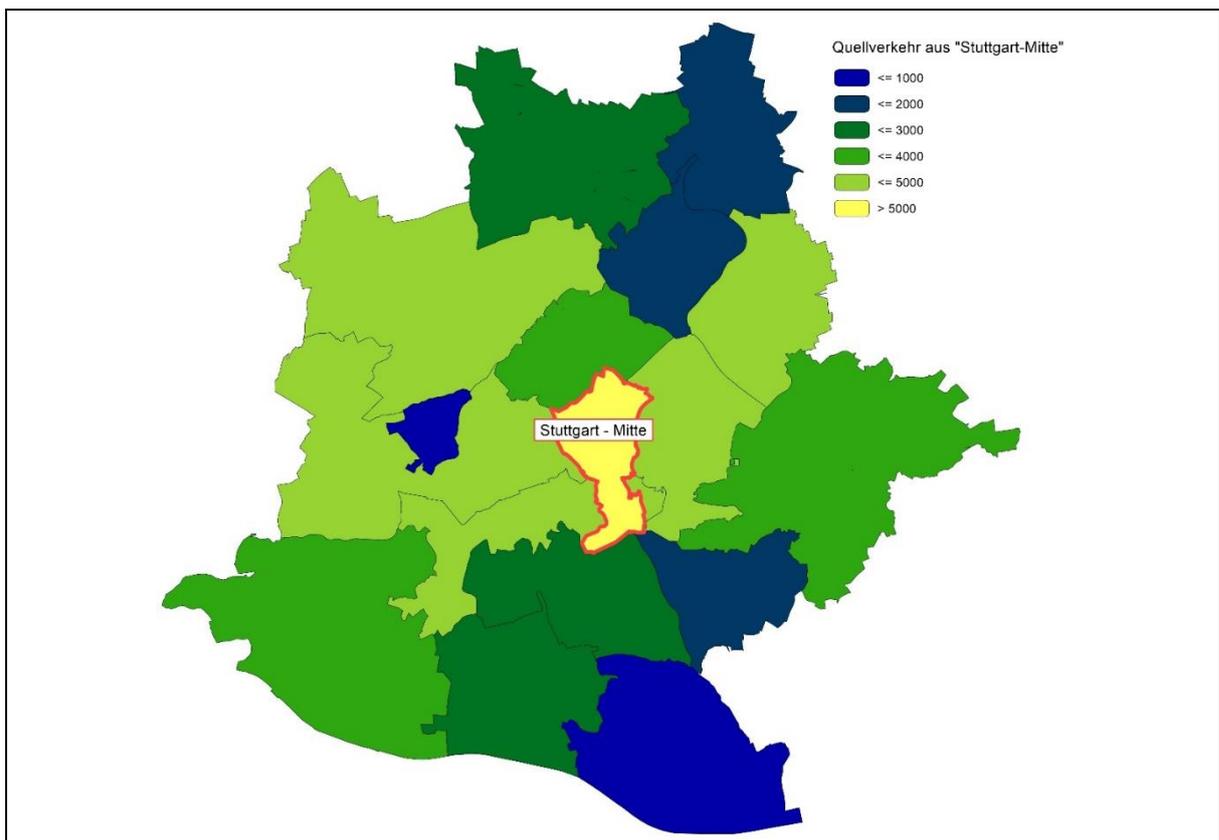


Abbildung 14-4: Beispielhafte Darstellung der Zielstadtbezirke für ausgewählte Verkehrsströme mit dem Quellstadtbezirk „Stuttgart-Mitte“ als Kartendarstellung (Stuttgart-Mitte weist einen hohen Binnenverkehrsanteil auf).

- Darstellung des Quell- oder Zielverkehrs aller Zellen bezogen auf eine Ziel- oder Quellzelle als „Word Cloud“<sup>42</sup> (beispielhaft dargestellt für ausgewählte Stadtbezirke des Verkehrsmodells des Verbands Region Stuttgart in Abbildung 14-5).



Abbildung 14-5: Beispielhafte Darstellung der Quellstadtbezirke für ausgewählte Verkehrsströme mit dem Zielstadtbezirk „Stuttgart-Mitte“ als Word Cloud (Stuttgart-Mitte weist einen hohen Binnenverkehrsanteil auf).

<sup>42</sup> Zu Deutsch: Wortwolke; eine Word Cloud präsentiert quantitative Informationen ohne Zahlen zu zeigen. [74]

## Anlage 2 Methoden

Die in dieser Anlage gezeigten Beispiele dienen ausschließlich der Erläuterung und sind in der Praxis wesentlich komplexer.

### Anlage 2.1 Parameterschätzung

#### Ziel

In diskreten Entscheidungsmodellen wird der Nutzen einer Alternative durch eine Nutzenfunktion beschrieben. Diese Nutzenfunktion gewichtet die Eigenschaften (z.B. Reisezeit und Reisekosten) der Alternativen und fasst sie zu einem Wert für den Nutzen zusammen. Die Eigenschaften der Alternativen sind Variablen und die Gewichtungsfaktoren sind Parameter. Ziel einer Parameterschätzung ist es, die Parameter der Nutzenfunktion so zu schätzen, dass die Abweichungen zwischen modellierten und beobachteten Werten möglichst klein sind.

Beispiel einer linearen Nutzenfunktion:

$$v_{gi} = \beta_{0gi} + \beta_{1g}x_{1i} + \beta_{2g}x_{2i} + \dots = \beta_{0gi} + \sum_k \beta_{kg}x_{ki}$$

mit

$v_{gi}$  deterministischer Nutzen der Alternative  $i$  für die Nachfragegruppe  $g$

$x_{k,i}$  Wert der  $k$ . Eigenschaft der Alternative  $i$

$\beta_{0,g}$  Parameter zur Beschreibung der alternativenspezifischen Konstante der Alternative  $i$  für die Nachfragegruppe  $g$

$\beta_{k,g}$  Parameter zur Gewichtung der  $k$ . Eigenschaft für die Nachfragegruppe  $g$

#### Methode

Die Maximum-Likelihood-Schätzung ist eine Methode zur Schätzung von Parametern in Nutzenfunktionen auf Basis von empirischen Daten. Dafür wird für jede Alternative eine Nutzenfunktion aufgestellt und mit einer geeigneten Bewertungsfunktion (z.B. Logit-Modell) die Wahrscheinlichkeit für die Wahl jeder Alternative berechnet. Anschließend wird die Wahlwahrscheinlichkeit anhand der tatsächlich beobachteten Wahl bewertet. Hierfür wird die Wahlwahrscheinlichkeit der Alternative logarithmiert, die tatsächlich gewählt worden ist. Die Summe dieser logarithmierten Wahlwahrscheinlichkeit wird bei der Maximum-Likelihood-Schätzung maximiert, so dass die  $\beta$ -Parameter die Ergebnisse der empirischen Daten bestmöglich widerspiegeln.

Mathematisch ausgedrückt wird die Log-Likelihood-Funktion  $L(\beta_0, \beta_k)$  maximiert:

$$L(\beta_0, \beta_k) = \sum_{n=1}^N \sum_i^I W_{n,i} \cdot \ln p(v(\beta_0, \beta_k))_{n,i}$$

mit

$L(\beta_0, \beta_k)$  Log-Likelihood-Funktion für die Parameter  $\beta_0$  und  $\beta_k$  [-]

$n \in N$  Anzahl der empirisch erhobenen Datensätze [-]

$i \in I$  Anzahl der Alternativen [-]

$p(v)_{n,i}$  Wahrscheinlichkeit, dass im Datensatz  $n$  die Alternative  $i$  gewählt wird [-]

$v(\beta_0, \beta_k)$  Nutzenfunktion für verschiedene Alternativen [-]

$W_{n,i}$  Wahlvariable [-]

= 1, wenn Alternative  $i$  im Datensatz  $n$  gewählt wurde

= 0, wenn Alternative  $i$  im Datensatz  $n$  nicht gewählt wurde.

### Beispiel

Gegeben seien 16 Datensätze einer Untersuchung zur Verkehrsmoduswahl zwischen den Alternativen Pkw ( $i = 1$ ) und ÖV ( $i = 2$ ). Für jeden Datensatz sind die Reisezeiten und die tatsächliche Wahl  $W(i)$  bekannt. Mit diesen Daten kann die nachstehende Tabelle aufgebaut werden:

- Spalte 1: Nummer des Datensatzes (= beobachtete Entscheidung einer Person)
- Spalte 2: beobachtete Reisezeit Pkw  $t_{Pkw}$
- Spalte 3: beobachtete Reisezeit ÖV  $t_{ÖV}$
- Spalte 4: Wahlvariable Pkw  
= 1, wenn Person Pkw wählt, sonst 0
- Spalte 5: Wahlvariable ÖV  
= 1, wenn Person ÖV wählt, sonst 0

- Spalte 6: Nutzenfunktion Pkw

$$v_{Pkw} = \beta_0 + \beta_1 \cdot t_{Pkw}$$

- Spalte 7: Nutzenfunktion ÖV

$$v_{ÖV} = \beta_1 \cdot t_{ÖV}$$

- Spalte 8: Wahrscheinlichkeit für die Wahl Pkw

$$p_{Pkw} = \frac{e^{v_{Pkw}}}{e^{v_{Pkw}} + e^{v_{ÖV}}}$$

- Spalte 9: Wahrscheinlichkeit für die Wahl ÖV

$$p_{\text{ÖV}} = \frac{e^{v_{\text{ÖV}}}}{e^{v_{\text{Pkw}}} + e^{v_{\text{ÖV}}}}$$

- Spalte 10: Log Likelihood Funktion

$$L(\beta_0, \beta_1) = W(\text{Pkw}) \cdot \ln p_{\text{Pkw}} + W(\text{ÖV}) \cdot \ln p_{\text{ÖV}}$$

Die Summe der Spalte 10 soll durch die Variation der Parameter  $\beta_0$  und  $\beta_1$  maximiert werden. Dazu kann in Excel die Solverfunktion (Daten + Solver) verwendet werden, die ggf. zuvor mit dem Add-Ins Manager aktiviert werden muss. Die Summe der Spalte 10 wird dabei als Zielzelle, die  $\beta$ -Parameter als veränderbare Zellen definiert.

Datensatz	$t_{\text{Pkw}}$	$t_{\text{ÖV}}$	$W(\text{Pkw})$	$W(\text{ÖV})$	$v_{\text{Pkw}}$	$v_{\text{ÖV}}$	$p_{\text{Pkw}}$	$p_{\text{ÖV}}$	$\text{Log } L$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	18	35	1	0	-5,358	-7,111	0,85	0,15	-0,16
2	29	56	1	0	-7,593	-11,378	0,98	0,02	-0,02
3	10	18	0	1	-3,733	-3,657	0,48	0,52	-0,66
4	22	18	0	1	-6,171	-3,657	0,07	0,93	-0,08
5	35	61	1	0	-8,812	-12,393	0,97	0,03	-0,03
6	31	60	1	0	-8,000	-12,190	0,99	0,01	-0,02
7	29	42	1	0	-7,593	-8,533	0,72	0,28	-0,33
8	21	27	0	1	-5,968	-5,486	0,38	0,62	-0,48
9	36	61	1	0	-9,015	-12,393	0,97	0,03	-0,03
10	29	26	0	1	-7,593	-5,282	0,09	0,91	-0,09
11	40	74	1	0	-9,828	-15,035	0,99	0,01	-0,01
12	11	13	1	0	-3,936	-2,641	0,22	0,78	-1,54
13	14	16	0	1	-4,546	-3,251	0,22	0,78	-0,24
14	36	48	0	1	-9,015	-9,752	0,68	0,32	-1,13
15	11	16	1	0	-3,936	-3,251	0,34	0,66	-1,09
16	36	31	0	1	-9,015	-6,298	0,06	0,94	-0,06
Summe			9	7					-5,97
Ergebnis									
$\beta_0 = -1,70$									
$\beta_1 = -0,20$									

Abbildung 14-6: Beispiel einer Parameterschätzung mit der Maximum Likelihood Methode.

#### Güte einer Parameterschätzung

Zur Bestimmung der Güte einer Maximum-Likelihood Schätzung wird der Likelihood-Ratio-Test (LRT) verwendet (vgl. u.a. Huelsenbeck & Crandall [76]). Dieser Test untersucht, ob eine Schätzung mit zusätzlichen Parametern ein signifikant besseres Ergebnis hat. Das Likelihood-Ratio  $LR$  berechnet sich zu

$$LR = 2 \cdot (L_2 - L_1)$$

mit

$LR$	Likelihood-Ratio
$L_2$	Log-Likelihood der Variante mit mehr Parametern
$L_1$	Log-Likelihood der Variante mit weniger Parametern oder ohne Parameter („Null-Log-Likelihood“)

Das  $LR$  folgt in etwa der Chi-Quadrat-Verteilung. Aus Tabellen (z.B. Backhaus et al. [5]) können mit der Anzahl der Freiheitsgrade (Differenz der Anzahl der Parameter) und dem Signifikanzniveau (z.B. 95 %) die Werte der Chi-Quadrat-Verteilung ermittelt werden und dem berechneten  $LR$  gegenübergestellt werden. Beim Hinzufügen eines Parameters  $\beta_k$  muss das Likelihood-Ratio  $LR$  einen Wert von mindestens 3,84 annehmen, um als „signifikant“ (95%) bewertet zu werden, und 8,81, um als „hochsignifikant“ (99,7%) zu gelten. Da das  $LR$  die doppelte Differenz der beiden Log-Likelihood-Werte ist, muss sich also das Log-Likelihood in diesen Fällen um ca. 1,9 bzw. 4,4 Log-Likelihood-Punkte erhöhen.

Eine weitere Größe, die häufig bei Maximum-Likelihood-Schätzungen angegeben wird, ist  $\rho^2$  (rho-square):

$$\rho^2 = 1 - \frac{L_1}{L_0}$$

mit

$\rho^2$	rho-square (Wertebereich zwischen 0 und 1)
$L_1$	Log-Likelihood des geschätzten Modells
$L_0$	Null-Log-Likelihood (alle $\beta_k = 0$ )

Je höher  $\rho^2$  ist, desto höher ist die Güte einer Schätzung. Allerdings sollten damit nur Schätzungen derselben Untersuchung verglichen werden, da der Vergleich des absoluten Wertes von  $\rho^2$  mit anderen Untersuchungen nicht sinnvoll ist.

#### Weiterführende Literatur

- „Statistical data analysis“ von Cowan [28]

## Anlage 2.2 Untersuchung von Elastizitäten

Eine wichtige Größe, um die Änderungen bei Realitätstests zu messen, sind Elastizitäten. Elastizitäten sind ein Maß dafür, wie stark sich die Nachfrage in Abhängigkeit der Variablenänderung ändert. Die sich ergebenden Wertebereiche der Elastizität  $\mathcal{E}$  zwischen einer abhängigen Variable  $X$  und einer unabhängigen Variable  $Y$  sind wie in Tabelle 14-3 zu interpretieren:

Elastizitätsbereich	Bezeichnung	Bedeutung
$ \mathcal{E}  = 0$	$X$ ist vollkommen unelastisch	$X$ reagiert nicht auf eine Änderung von $Y$ .
$0 <  \mathcal{E}  < 1$	$X$ ist unelastisch	Die relative Änderung von $X$ ist kleiner als die von $Y$ .
$ \mathcal{E}  = 1$	$X$ ist proportional elastisch	Die relative Änderung von $X$ ist gleich der von $Y$ .
$ \mathcal{E}  > 1$	$X$ ist elastisch	Die relative Änderung von $X$ ist größer als die von $Y$ .
$ \mathcal{E}  \rightarrow \infty$	$X$ ist vollkommen elastisch	Die relative Änderung von $X$ ist selbst bei der kleinsten Änderung von $Y$ unendlich hoch.
$\mathcal{E} < 0$		Eine positive relative Änderung von $Y$ führt zu einer negativen relativen Änderung von $X$ .

Tabelle 14-3: Wertebereich von Elastizitäten.

Im Folgenden werden zwei Arten von Elastizitätsbetrachtungen bei Verkehrsnachfragemodellen beschrieben:

- Elastizitäten einer Bewertungsfunktion
- Elastizitäten eines Verkehrsnachfragemodells

### Anlage 2.2.1 Elastizitäten einer Bewertungsfunktion

#### Ziel

Mit der Berechnung der Elastizität kann das durch die Bewertungsfunktion abgebildete Bewertungsverhalten der Verkehrsteilnehmenden genauer spezifiziert und somit verschiedene Bewertungsfunktionen miteinander verglichen werden.

Die Elastizität  $\mathcal{E}$  ist in diesem Fall ein dimensionsloses Maß, welches die relative Änderung des bewerteten Nutzens  $b$  einer Alternative als Reaktion auf die relative Änderung des Nutzens  $v$  einer Alternative angibt. Im Allgemeinen wird der Nutzen einer Alternative bei der Berechnung der Elastizität nur als Ganzes betrachtet und nicht als Nutzenfunktion  $v(x_1 \dots x_k)$  mehrerer Kenngrößen  $x_k$ .

Inhaltlich kann die Elastizität auch als Empfindlichkeit der Verkehrsteilnehmenden gegenüber Aufwandsänderungen interpretiert werden.

#### Methode

Es bestehen verschiedene Möglichkeiten Elastizitäten zu berechnen. Eine erste Möglichkeit ist die Ermittlung der **Bogenelastizität**. Hier wird die Elastizität auf Basis der Differenz zwischen gewählten

Startwerten  $b_0, v_0$  und Endwerten  $b_1, v_1$  ermittelt und ein relativer Bezug zu den Startwerten hergestellt. Die Berechnungsformel der Bogenelastizität ist damit gegeben durch

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta b}{b_0}}{\frac{\Delta v}{v_0}} = \frac{\frac{b_1 - b_0}{b_0}}{\frac{v_1 - v_0}{v_0}}$$

mit

$b$  bewerteter Nutzen

$v$  Nutzen

Weitere Untervarianten sind der Herstellung eines relativen Bezuges zu den Endwerten oder einem Mittelwert zwischen diesen Werten

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta b}{\frac{(b_0 + b_1)}{2}}}{\frac{\Delta v}{\frac{(v_0 + v_1)}{2}}} = \frac{\frac{b_1 - b_0}{\frac{(b_0 + b_1)}{2}}}{\frac{v_1 - v_0}{\frac{(v_0 + v_1)}{2}}}$$

Da bei der Berechnung nur Start- und Endwerte berücksichtigt werden, stellt die Bogenelastizität nur ein Durchschnittsmaß für den Bereich zwischen diesen Werten dar.

Liegt hingegen eine differenzierbare Bewertungsfunktion  $b = f(v)$  vor, bietet sich die Möglichkeit zur Berechnung einer **Punkt**elastizität. Hier wird aus der betrachteten Differenz ein Differential (bzw. sinnbildlich ein Punkt) mit  $\Delta v \rightarrow 0$  und es halten dementsprechend die Techniken der Infinitesimalrechnung Einzug. Die Elastizität ergibt sich auf Basis die erste Ableitung der Bewertungsfunktion mit

$$\varepsilon = \frac{db}{dv} \cdot \frac{v}{b} = \frac{db}{dv} \cdot \frac{1}{\frac{1}{v}} = \frac{d \ln b}{d \ln v}$$

Die Punkt

elastizität betrachtet somit relative infinitesimale Änderungen.

#### Alternative Verfahren / Verfahrenserweiterungen

Schließt man die Nutzenfunktion  $v(x_1 \dots x_k)$  in die Betrachtung mit ein und drückt die Bewertung als  $b = f(x_1 \dots x_k)$  aus, können partielle Ableitungen und damit entsprechende Elastizitäten hinsichtlich einzelner Kenngrößen gebildet werden:

$$\varepsilon_k = \frac{\partial b}{\partial x_k} \frac{x_k}{b}$$

#### Weiterführende Literatur

- „Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung“ von Lohse & Schnabel [111]

#### Beispiel

Die Bewertungsfunktion eines Logit-Entscheidungsmodells lautet

$$f(v) = e^{\alpha \cdot v}$$

Die Punktelastizität ist damit gegeben durch

$$\varepsilon = \frac{db}{dv} \frac{v}{b} = \alpha \cdot e^{\alpha \cdot v} \frac{v}{e^{\alpha \cdot v}} = \alpha \cdot v$$

Der Verlauf der Elastizitätsfunktion  $\varepsilon(v)$  der Logit-Bewertungsfunktion ist demnach je nach Vorzeichen des  $\alpha$ -Parameters linear steigend oder fallend.

Die Bewertungsfunktion des Kirchhoff-Entscheidungsmodells ist gegeben durch

$$f(v) = v^\alpha$$

und die Punktelastizität lässt sich berechnen mit

$$\varepsilon = \frac{db}{dv} \frac{v}{b} = \alpha \cdot v^{\alpha-1} \frac{v}{v^\alpha} = \alpha \cdot v^0 = \alpha$$

Im Fall der Kirchhoff-Bewertungsfunktion ist der Verlauf der Elastizitätsfunktion somit über den gesamten Nutzenwertebereich konstant.

In Abbildung 14-7 sind die Verläufe der Elastizitätsfunktionen von Logit- und Kirchhoff-Bewertungsfunktion für  $\alpha = -1$  gegenübergestellt.

Man erkennt im Fall der Logit-Bewertungsfunktion einen linearen fallenden Verlauf der Elastizitätsfunktion. Die Verkehrsteilnehmenden reagieren demnach auf große absolute Nutzenänderungen elastischer. Durch den linearen Verlauf reagieren sie allerdings für eine bestimmte konstante absolute Nutzenänderung immer mit der gleichen Elastizität und berücksichtigt nicht die Größenordnung, in der sich die Nutzenwerte befinden. Auf eine Nutzenänderung von 5 auf 10 min und 100 auf 105 min reagieren die Verkehrsteilnehmenden somit gleich empfindlich.

Im Fall der Kirchhoff-Bewertungsfunktion hat die Elastizitätsfunktion einen konstanten Verlauf. Die Verkehrsteilnehmenden reagieren auf verschiedene absolute Nutzenänderungen immer mit der gleichen Elastizität. Im konkreten Beispiel führt dies zu einer erhöhten Empfindlichkeit im Bereich von Nutzenwerten  $< 1$  im Vergleich zur Logit-Bewertungsfunktion. Die konstante Elastizität gilt allerdings nur für eine bestimmte konstante relative Nutzenänderung, da im Fall der Kirchhoff-Bewertungsfunktion die relativen Nutzenänderungen und nicht wie im Logit-Fall die absoluten Nutzenänderungen bewertet werden. Die Größenordnung der Nutzenwerte wird auch durch die Kirchhoff-Bewertungsfunktion nicht

berücksichtigt. Auf eine Nutzenänderung von 10 auf 20 min und 50 auf 100 min reagieren die Verkehrsteilnehmenden somit gleich empfindlich.

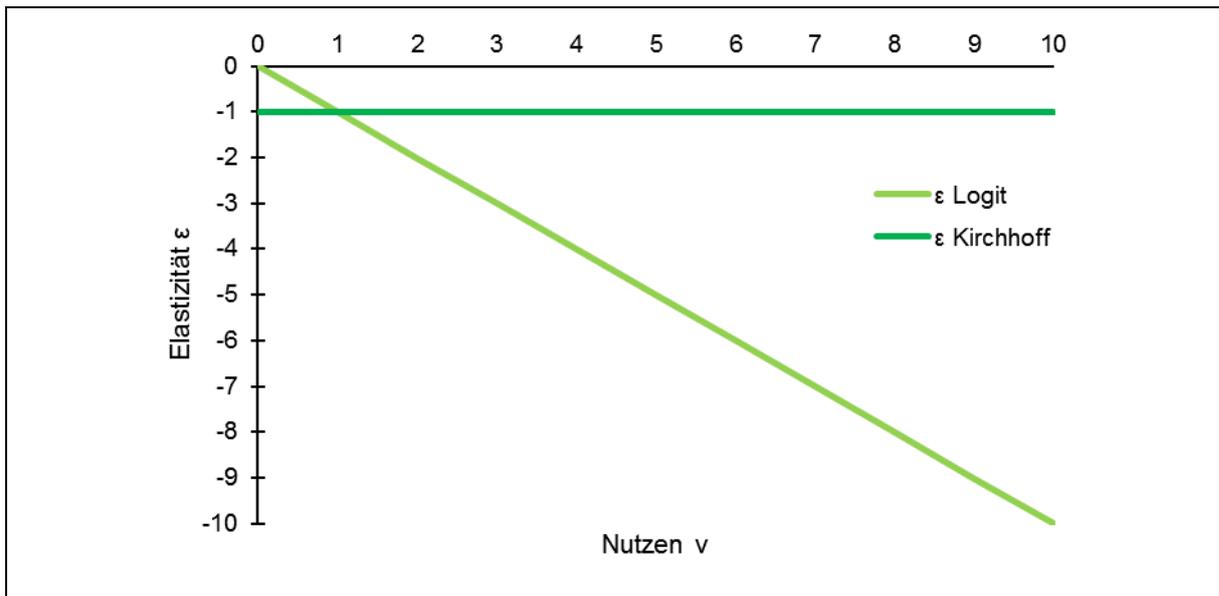


Abbildung 14-7: Vergleich der Elastizitätsfunktionen ( $\alpha = -1$ ).

## Anlage 2.2.2 Elastizitäten eines Verkehrsnachfragemodells

### Ziel

Anhand von Realitätstest kann die Elastizität des gesamten Nachfragemodells ermittelt und bewertet werden. Rieser et al. [107] stellen in ihrem Forschungsbericht eine Auswahl solcher Tests inklusive der Vorgehensweise, der zu erwartenden Ergebnisse und beispielhaften Auswertungen vor. Sie verwenden dafür die folgende Berechnungsvorschrift, die u.a. auch von WebTAG [37] empfohlen wird:

$$\varepsilon = \frac{\ln\left(\frac{\text{Nachfrage}_{\text{nachher}}}{\text{Nachfrage}_{\text{vorher}}}\right)}{\ln\left(\frac{\text{Kosten}_{\text{nachher}}}{\text{Kosten}_{\text{vorher}}}\right)}$$

Zusammenfassend werden bezogen auf die Elastizitätsbereiche folgende Aussagen gemacht:

Realitätstest	Bezugsgröße	Erwartung an die Elastizität
Veränderung der Einwohnerzahl	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsaufkommen / Einwohneränderung</li> <li>Verkehrsleistung / Einwohneränderung</li> <li>Verkehrszeitaufwand / Einwohneränderung</li> </ul>	<p>über alle Einwohner:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\varepsilon &lt; 1</math> für kapazitätsabhängige Modi (Pkw, ggf. ÖV)</li> <li><math>\varepsilon &gt; 1</math> für kapazitätsunabhängige Modi (Fuß, Rad, ggf. ÖV)</li> </ul> <p>pro Einwohner:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\varepsilon &lt; 0</math> für kapazitätsabhängige Modi (Pkw, ggf. ÖV)</li> <li><math>\varepsilon &gt; 0</math> für kapazitätsunabhängige Modi (Fuß, Rad, ggf. ÖV)</li> </ul>
Veränderung der Reisegeschwindigkeit <sup>43</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsaufkommen / Streckengeschwindigkeitsänderung</li> <li>Verkehrsleistung / Streckengeschwindigkeitsänderung</li> </ul>	<p>über alle Einwohner und pro Einwohner:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\varepsilon &gt; 0</math> wenn Modus von Geschwindigkeitsänderung direkt betroffen ist (i.d.R. Pkw; WebTAG [32] fordert <math>\varepsilon \geq -2</math> bei einer Erhöhung der Fahrtzeit)</li> <li><math>\varepsilon &lt; 0</math> wenn Modus nicht direkt von Geschwindigkeitsänderung betroffen ist</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrszeitaufwand / Streckengeschwindigkeitsänderung</li> </ul>	<p>über alle Einwohner und pro Einwohner, für alle Modi:</p> $\varepsilon < 0$
Veränderung der Bedienungshäufigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsaufkommen / Bedienungshäufigkeitsänderung</li> <li>Verkehrsleistung / Bedienungshäufigkeitsänderung</li> <li>Verkehrszeitaufwand / Bedienungshäufigkeitsänderung</li> </ul>	<p>über alle Einwohner und pro Einwohner:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\varepsilon &gt; 0</math> für Modus ÖV</li> <li><math>\varepsilon &lt; 0</math> für andere Modi</li> <li><math>\varepsilon \approx 0</math> über alle Modi</li> </ul>

<sup>43</sup> Es ist zu beachten, dass der Effekt dieses Tests vom Funktionstyp der Bewertungsfunktion abhängt, da zum Beispiel Logit-Modelle Verhältnisse und Kirchhoff-Modelle Differenzen bewerten.

Realitätstest	Bezugsgröße	Erwartung an die Elastizität
Veränderung des IV-Treibstoffpreises	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsaufkommen / Treibstoffpreisänderung</li> </ul>	über alle Einwohner und pro Einwohner: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\varepsilon &lt; 0</math> wenn Modus von Treibstoffpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. Pkw)</li> <li><math>\varepsilon &gt; 0</math> wenn Modus nicht direkt von Treibstoffpreisänderung betroffen ist</li> <li><math>\varepsilon \approx 0</math> über alle Modi</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsleistung / Treibstoffpreisänderung</li> </ul>	über alle Einwohner und pro Einwohner: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\varepsilon &lt; 0</math> wenn Modus von Treibstoffpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. Pkw; WebTAG [32] fordert <math>-0,35 \leq \varepsilon \leq -0,25</math>)</li> <li><math>\varepsilon &gt; 0</math> wenn Modus nicht direkt von Treibstoffpreisänderung betroffen ist</li> <li><math>\varepsilon \leq 0</math> über alle Modi</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrszeitaufwand / Treibstoffpreisänderung</li> </ul>	über alle Einwohner und pro Einwohner: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\varepsilon &lt; 0</math> wenn Modus von Treibstoffpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. Pkw)</li> <li><math>\varepsilon &gt; 0</math> wenn Modus nicht direkt von Treibstoffpreisänderung betroffen ist</li> <li><math>\varepsilon \leq 0</math> über alle Modi</li> </ul>
Veränderung der ÖV-Ticketpreise	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsaufkommen / Ticketpreisänderung</li> </ul>	über alle Einwohner und pro Einwohner: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\varepsilon &lt; 0</math> wenn Modus von Ticketpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. ÖV; WebTAG [32] fordert <math>-0,9 \leq \varepsilon \leq -0,2</math> bzw. konkret für Bus: <math>-0,9 \leq \varepsilon \leq -0,7</math>)</li> <li><math>\varepsilon \geq 0</math> wenn Modus nicht direkt von Ticketpreisänderung betroffen ist</li> <li><math>\varepsilon \approx 0</math> über alle Modi</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsleistung / Ticketpreisänderung</li> <li>Verkehrszeitaufwand / Ticketpreisänderung</li> </ul>	über alle Einwohner und pro Einwohner: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\varepsilon &lt; 0</math> wenn Modus von Ticketpreisänderung direkt betroffen ist (i.d.R. ÖV)</li> <li><math>\varepsilon \geq 0</math> wenn Modus nicht direkt von Ticketpreisänderung betroffen ist</li> <li><math>\varepsilon \leq 0</math> über alle Modi</li> </ul>

Tabelle 14-4: Wertebereich von Elastizitäten.

Weiterführende Literatur

- „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen“ von Rieser et al. [107]
- „Understanding Transport Demands and Elasticities“ von Littman [84]
- „WebTAG (Unit M2)“ [37]

## Anlage 2.3 Matrixermittlung mit Randsummenbedingungen

### Ziel

Zur Abbildung einer Zielwahl (bzw. zusätzlich einer Moduswahl) wird eine Nachfragematrix auf Basis von Aufwandsbewertungen sowie empirischen Randsummenbedingungen ermittelt. Über die Randsummenbedingungen können reale Raumrestriktionen oder sonstige Bilanzbedingungen bei der Matrixermittlung berücksichtigt werden. Die dazu verwendeten Randsummen stellen meist zellenbezogene (bzw. Modal-Split-bezogene) Verkehrsaufkommenswerte dar.

### Methode

Eine Ausgangsmatrix auf Basis der Aufwandsbewertungen  $b(v_{od})$  wird über die zellenbezogenen Korrekturfaktoren  $f_{d_o^p}$  bzw.  $f_{d_d^a}$  an die Randsummen (zellenbezogene Verkehrsaufkommenswerte  $d_o^p$  bzw.  $d_d^a$ ) angepasst. Es entsteht eine Nachfragematrix, deren Verkehrsströme sich mit

$$d_{od} = b(v_{od}) \cdot f_{d_o^p} \cdot f_{d_d^a}$$

unter Beachtung folgender Randsummenbedingungen

$$d_o^{p,\min} \leq d_o^p = \sum_{d \in Z} d_{od} \leq d_o^{p,\max}$$

$$d_d^{a,\min} \leq d_d^a = \sum_{o \in Z} d_{od} \leq d_d^{a,\max}$$

berechnen.

In der Literatur (z.B. von Lohse & Schnabel [111]) wird die Vorgehensweise auch als Grundmodell der Zielwahl bezeichnet, da beliebige Bewertungsfunktionen eingesetzt werden können.

Eine simultane Berücksichtigung der Moduswahl erfolgt über die Einführung eines verkehrsmodusbezogenen Korrekturfaktors  $f_{d_m}$ , der die nun dreidimensionale Ausgangsmatrix (erweitert um die Dimension Verkehrsmodus) an die verkehrsmodusbezogenen Randsummen (Absolute Anteile des Modal-Splits  $d_m$ ) anpasst. Die Verkehrsströme der Matrix ergeben sich als

$$d_{odm} = b(v_{odm}) \cdot f_{d_o^p} \cdot f_{d_d^a} \cdot f_{d_m}$$

unter Beachtung folgender Randsummenbedingungen

$$d_o^{p,\min} \leq d_o^p = \sum_{d \in Z} \sum_{m \in M} d_{odm} \leq d_o^{p,\max}$$

$$d_d^{a,\min} \leq d_d^a = \sum_{o \in Z} \sum_{m \in M} d_{odm} \leq d_d^{a,\max}$$

$$d_m = \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{odm}$$

In diesem Fall spricht man auch vom Grundmodell der simultanen Ziel- und Moduswahl.

Zur Berechnung der Korrekturfaktoren existieren numerische Lösungsverfahren, die das entstehende Gleichungssystem durch iteratives Anpassen der Faktoren lösen. Bekannte Verfahren sind der Furness- oder der Multi-Algorithmus. Sie bestimmen die Korrekturfaktoren derart, dass bei Einhaltung der Randsummen nur eine minimale Abweichung zur Ausgangsmatrix auf der Basis der Aufwandsbewertungen entsteht. Speziell passt der Furness-Algorithmus je Iteration immer abwechselnd nur die Faktoren für eine Dimension von Randsummen an, wohingegen der Multi-Algorithmus je Iteration die Faktoren für alle Dimensionen von Randsummen gleichzeitig anpasst. Damit arbeitet der Multi-Algorithmus meist schneller, konvergiert allerdings im Gegensatz zum Furness-Algorithmus nicht in jedem Fall.

#### Weiterführende Literatur

- „Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung“ von Lohse & Schnabel [111]
- „Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung“ von Schiller [110]

#### Beispiel

##### **FURNESS-Algorithmus**

Im Fall des Furness-Algorithmus werden die Korrekturfaktoren für das Grundmodell der Zielwahl mit unelastischen Randsummenbedingungen, also

$$d_o^{p,Soll} = d_o^{p,min} = d_o^{p,max}$$

$$d_d^{a,Soll} = d_d^{a,min} = d_d^{a,max}$$

wie folgt berechnet:

$$f_{d_d^a}^{(0)} = 1$$

$$f_{d_o^p}^{(n)} = \frac{d_o^{p,Soll}}{\sum_{d \in Z} b(v_{od}) \cdot f_{d_d^a}^{(n-1)}}$$

$$f_{d_d^a}^{(n)} = \frac{d_d^{a,Soll}}{\sum_{o \in Z} b(v_{od}) \cdot f_{d_o^p}^{(n)}}$$

Die Verkehrsnachfrage ergibt sich daraus mit

$$d_{od}^{(n+1)} = b(v_{od}) \cdot f_{d_o^p}^{(n)} \cdot f_{d_d^a}^{(n)}$$

Im Folgenden wird der Ablauf der ersten drei Iterationen eines Furness-Algorithmus anhand eines numerischen Beispiel verdeutlicht:

Iteration  $n = 0$

$f_{d_d}^{(0)}$	1	1	

Iteration  $n = 1$

$$b(v_{od}) = d_{od}^{(1)}$$

			$d_o^{p,Ist}$	$d_o^{p,Soll}$	$f_{d_o^p}^{(1)}$
	0,10	0,40	0,50	50	100,000
	0,20	0,15	0,35	100	285,714
$d_d^{a,Ist}$	0,30	0,55			
$d_d^{a,Soll}$	25	125			
$f_{d_d}^{(1)}$	0,372	1,509			

Iteration  $n = 2$

			$d_o^{p,Ist}$	$d_o^{p,Soll}$	$f_{d_o^p}^{(2)}$
	3,72	60,34	64,07	50	78,042
	21,28	64,66	85,93	100	332,490
$d_d^{a,Ist}$	25,00	125,00			
$d_d^{a,Soll}$	25	125			
$f_{d_d}^{(2)}$	0,336	1,541			

Iteration  $n = 3$

			$d_o^{p,Ist}$	$d_o^{p,Soll}$	$f_{d_o^p}^{(3)}$
--	--	--	---------------	----------------	-------------------

	2,63	48,12	50,75	50	76,894
	22,37	76,88	99,25	100	334,989
$d_d^{a,Ist}$	25,00	125,00			
$d_d^{a,Soll}$	25	125			
$f_{d_d^a}^{(3)}$	0,335	1,543			

### MULTI-Algorithmus

Im Fall des Multi-Algorithmus wird die Berechnungsformel des Grundmodells der Zielwahl mit unelastischen Randsummenbedingungen zunächst leicht abgewandelt, sodass sich die Verkehrsnachfrage wie folgt ergibt:

$$d_{od}^{(n+1)} = d_{od}^{(n)} \cdot \frac{f_{d_o^p}^{(n)}}{f_{d_o^p}^{(n)}} \cdot \frac{f_{d_d^a}^{(n)}}{f_{d_d^a}^{(n)}} \cdot f_d^{(n)}$$

Die Korrekturfaktoren im für den MULTI-Algorithmus angepassten Grundmodell der Zielwahl werden dann wie folgt berechnet:

$$f_{d_o^p}^{(n)} = \frac{d_o^{p,Soll}}{d_o^{p,Ist}}$$

$$f_{d_d^a}^{(n)} = \frac{d_d^{a,Soll}}{d_d^{a,Ist}}$$

$$\frac{1}{f_{d_o^p}^{(n)}} = \frac{\sum_{d \in Z} d_{od}^{(n)} \cdot f_{d_d^a}^{(n)}}{d_o^{p,Ist}}$$

$$\frac{1}{f_{d_d^a}^{(n)}} = \frac{\sum_{o \in Z} d_{od}^{(n)} \cdot f_{d_o^p}^{(n)}}{d_d^{a,Ist}}$$

und

$$f_d^{(n)} = \frac{d^{Soll}}{d^{Ist}}$$

mit

$$d^{Soll} = \sum_{d \in Z} d_o^{p, Soll} = \sum_{o \in Z} d_a^{d, Soll}$$

$$d^{Ist} = \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^{(n)}$$

Im Folgenden wird der Ablauf der ersten drei Iterationen eines MULTI-Algorithmus anhand eines numerischen Beispiel verdeutlicht:

Iteration  $n = 1$

$$b(v_{od}) = d_{od}^{(1)}$$

			$d_o^{p, Ist}$	$d_o^{p, Soll}$	$f_{d_o^p}^{(1)}$	$\overline{f_{d_o^p}^{(1)}}$
	0,10	0,40	0,50	50	100,000	198,485
	0,20	0,15	0,35	100	285,714	145,022
$d_d^{a, Ist}$	0,30	0,55	0,85			
$d_d^{a, Soll}$	25	125		150		$f_d^{(1)}$
$f_{d_d^a}^{(1)}$	83,333	227,273				176,47
$\overline{f_{d_d^a}^{(1)}}$	223,810	150,649				

Iteration  $n = 2$

$$d_{od}^{(2)}$$

			$d_o^{p, Ist}$	$d_o^{p, Soll}$	$f_{d_o^p}^{(2)}$	$\overline{f_{d_o^p}^{(2)}}$
	3,31	53,65	56,96	50	0,878	0,939
	25,89	78,68	104,57	100	0,956	0,923
$d_d^{a, Ist}$	29,20	132,33	161,53			
$d_d^{a, Soll}$	25	125		150		$f_d^{(2)}$
$f_{d_d^a}^{(2)}$	0,856	0,945				0,93
$\overline{f_{d_d^a}^{(2)}}$	0,947	0,924				

Iteration  $n = 3$

$$d_{od}^{(3)}$$

	$d_o^{p, Ist}$	$d_o^{p, Soll}$	$f_{d_o^p}^{(3)}$	$\overline{f_{d_o^p}^{(3)}}$

	2,60	47,56	50,16	50	0,997	1,000
	22,52	77,37	99,89	100	1,001	0,999
$d_d^{a,Ist}$	25,11	124,94	150,05			
$d_d^{a,Soll}$	25	125		150		$f_d^{(3)}$
$f_{d_d^a}^{(3)}$	0,995	1,001				1,00
$\overline{f_{d_d^a}^{(3)}}$	1,001	0,999				

## Anlage 2.4 Bewertung von Verkehrsstärken und personenbezogenen Mobilitätskenngrößen unter der Berücksichtigung von Standardabweichung und Stichprobengröße

### Ziel

Friedrich et al. [65] beschreiben ein Verfahren für die Bewertung von Verkehrsstärken und personenbezogenen Mobilitätskenngrößen. Ziel dieses Verfahrens ist es, Erhebungsdaten, die eine große Standardabweichung oder eine geringe Stichprobengröße aufweisen, entsprechend in die Bewertung einfließen zu lassen, um größere Abweichungen zu modellierten Werten zuzulassen.

### Methode

Zunächst wird das Gütemaß  $SQV$  nach der in Kapitel 8.4.1 vorgestellten Berechnungsvorschrift bestimmt:

$$a = \sqrt{(m - c)^2}$$

$$g_{SQV} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{a^2}{f \cdot c}}}$$

mit

$g_{SQV}$	Gütemaß $SQV$
$a$	absolute Abweichung
$m$	Verkehrsstärke des Modells
$c$	Verkehrsstärke der Erhebung
$f$	Skalierungsfaktor

Wenn ein vorgegebener Wertebereich erreicht wurde, ist der Gütenachweis bereits erfüllt.

Aggregierte Erhebungswerte weisen immer eine gewisse Streuung auf, z.B. streuen einzelne Zählraten um den Mittelwert einer Dauerzählstelle. Wenn der Erhebungswert  $c$  eine Standardabweichung<sup>44</sup>  $\sigma_c$  aufweist, die größer als die implizite Standardabweichung des  $SQV$ -Werts  $\sigma_{SQV}$  ist, dann erfolgt der Gütenachweis mit einem korrigierten Erhebungswert  $c^+$ . Die implizite Standardabweichung  $\sigma_{SQV}$  errechnet sich mit folgender Formel:

---

<sup>44</sup> Falls für keine Standardabweichung  $\sigma_c$  für einen Erhebungswert  $c$  vorliegt, kann die Standardabweichung  $\sigma_c$  näherungsweise als Funktion  $\sigma_c(c) = c^\beta$  des Erhebungswertes  $c$  beschrieben werden kann. Für weitere Informationen siehe Friedrich et al. [65].

$$\sigma_{SQV}(c) \approx \frac{(1 - g_{SQV}) \sqrt{f}}{g_{SQV}} \cdot \sqrt{c}$$

mit

$g_{SQV}$  Gütemaß  $SQV$

$\sigma_{SQV}(c)$  implizite Standardabweichung des  $SQV$ -Werts in Abhängigkeit von  $c$

$c$  Verkehrsstärke der Erhebung

$f$  Skalierungsfaktor

Die Differenz zwischen der tatsächlichen und der impliziten Standardabweichung wird nun genutzt, um den Messwert so zu korrigieren, dass der Messwert erhöht wird.

$$c^+ = c + \text{MAX} \left( 0; \sigma_c(c) - \sigma_{SQV}(c) \right)$$

mit

$c^+$  um den Einfluss der Standardabweichung korrigierte Verkehrsstärke der Erhebung

$\sigma_{SQV}(c)$  implizite Standardabweichung des  $SQV$ -Werts in Abhängigkeit von  $c$

$\sigma_c(c)$  Standardabweichung von  $c$  in Abhängigkeit von  $c$

$c$  Verkehrsstärke der Erhebung

Mit dem korrigierten Messwert  $c^+$  wird das um den Einfluss der Standardabweichung korrigierte Gütemaß  $g_{SQV}^+$  ermittelt. Dabei bleibt die absolute Abweichung  $a = \sqrt{(m - c)^2}$  unverändert, um sicherzustellen, dass der Modellwert keinen Einfluss auf das Ergebnis hat.

$$g_{SQV}^+ = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{a^2}{f \cdot c^+}}}$$

mit

$g_{SQV}^+$  um den Einfluss der Standardabweichung korrigiertes Gütemaß  $SQV$

$a$  absolute Abweichung

$m$  Verkehrsstärke des Modells

$c$  Verkehrsstärke der Erhebung

$c^+$  um den Einfluss der Standardabweichung korrigierte Verkehrsstärke der Erhebung

$f$  Skalierungsfaktor

Bei Erhebungswerten, die nicht den Mittelwert der Grundgesamtheit, sondern den Mittelwert einer Stichprobe darstellen, wird nun der relative Stichprobenfehler  $r_s$  ermittelt. Dabei muss der Konfidenzkoeffizient  $z_{1-\alpha/2}$  festgelegt werden. Für die Ermittlung der Modellgüte wird ein Konfidenzkoeffizient  $z_{1-\alpha/2} = 1,0$  vorgeschlagen, was einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,317$  entspricht, d.h. 68,3% ( $= 1 - \alpha$ ) aller beobachteten Werte können im Intervall von  $\pm\sigma$  gefunden werden.

$$r_s = \frac{z_{1-\alpha/2} \cdot V}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{(N-n)}{(N-1)}} \xrightarrow{\text{mit } z_{1-\alpha/2} = 1,0} r_s = \frac{V}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{(N-n)}{(N-1)}}$$

mit

$r_s$  maximaler relativer Stichprobenfehler (Konfidenzintervall der Stichprobe)

$z$  Konfidenzkoeffizient für ein Signifikanzniveau  $\alpha$

$V$  Variationskoeffizient der Grundgesamtheit ( $V = \sigma/\mu$ )

$N$  Umfang der Grundgesamtheit

$n$  Umfang der Stichprobe

$\sigma$  Standardabweichung der Grundgesamtheit

$\mu$  Mittelwert der Grundgesamtheit

Mit dem relativen Stichprobenfehler  $r_s$  wird dann eine weitere Korrektur des Messwerts um den Einfluss der Stichprobengröße durchgeführt, was zu einem Gütemaß  $g_{SQV}^{+S}$  führt. Die absolute

Abweichung  $a = \sqrt{(m-c)^2}$  bleibt auch hier unverändert.

$$c^{+S} = c^+ (1 + r_s)$$

$$g_{SQV}^{+S} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{a^2}{f \cdot c^{+S}}}}$$

mit

$g_{SQV}^{+S}$  um den Einfluss der Standardabweichung und der Stichprobengröße korrigiertes Gütemaß  $SQV$

$a$	absolute Abweichung
$m$	Verkehrsstärke des Modells
$c$	Verkehrsstärke der Erhebung
$c^+$	um den Einfluss der Standardabweichung korrigierte Verkehrsstärke der Erhebung
$c^{+S}$	um den Einfluss der Standardabweichung und der Stichprobengröße korrigierte Verkehrsstärke der Erhebung
$f$	Skalierungsfaktor

#### Weiterführende Literatur

- „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen“ von Rieser et al. [107]
- „Scalable GEH: A Quality Measure for Comparing Observed and Modeled Single Values in a Travel Demand Model Validation“ von Friedrich et al. [65]

#### Beispiel

Abbildung 14-8 zeigt ein Beispiel für die Zusammensetzung der zulässigen relativen Abweichung für Messwerte der stündlichen Verkehrsstärke ( $f = 1.000$ ) an Werktagen ( $N = 250$  Tage pro Jahr). Die zulässige relative Abweichung umfasst drei Bestandteile:

- Relative Abweichung aus dem Gütemaß  $g_{SQV} = 0,85$ . (Die dargestellten Abweichungen entsprechen einem  $GEH$  von ca. 5,4.)
- Relative Abweichung bei der Berücksichtigung größerer Standardabweichungen. Im Beispiel wird angenommen, dass die Standardabweichung mit  $\sigma_c(c) = c^{0,9}$  größer ist als die implizite Standardabweichung des  $SQV$   $\sigma_{SQV}(c)$ . (Die dargestellten Abweichungen entsprechen einem  $GEH$  von ca. 6,2.)
- Relative Abweichung aus dem Stichprobenfehler. Im Beispiel wird angenommen, dass der Messwert an einem Tag erhoben wurde ( $n = 1$ ). (Die dargestellten Abweichungen entsprechen einem  $GEH$  von ca. 7,4.)

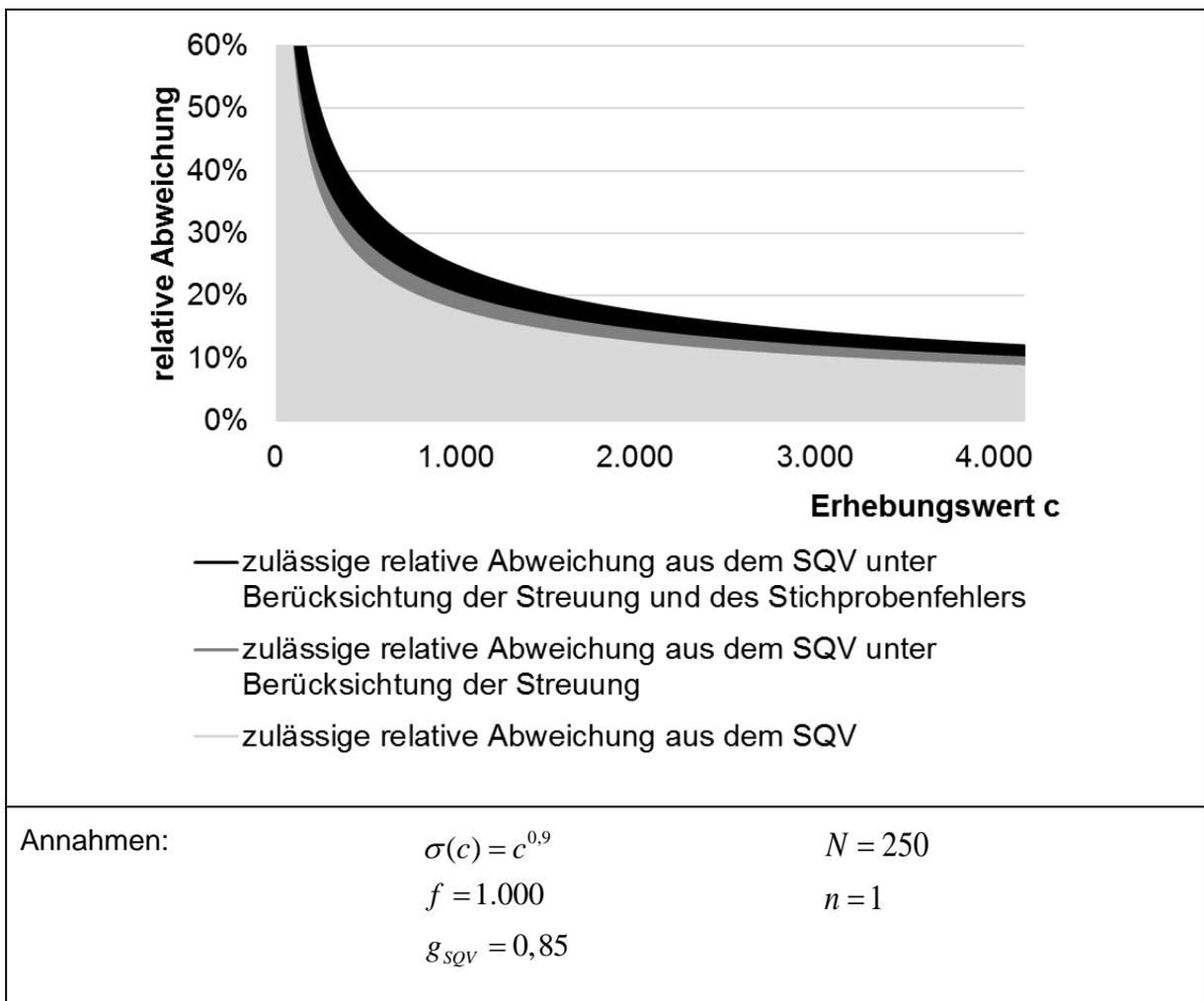


Abbildung 14-8: Beispiel für die Berechnung der zulässigen Abweichungen bei gegebenem  $SQV$ -Wert, unter Berücksichtigung von Standardabweichung und Stichprobenfehler (Bildquelle: in Anlehnung an Friedrich et al. [65]).

## Anlage 2.5 Klassierung von Verteilungen

### Ziel

Kenngrößenverteilungen sind ein gängiges Werkzeug der Verkehrsplanung. Mit ihnen lässt sich die Aufteilung der Nachfrage in mehrere diskrete Klassen analysieren und bei Vorliegen eines geeigneten Referenzdatensatzes dienen sie auch der Modellvalidierung. Die häufigsten Anwendungsfälle für Verteilungen sind Reiseweiten- oder Reisezeitverteilungen.

Trotz der häufigen Anwendung und der Wichtigkeit von Verteilungen werden in gängigen Richtlinien aus der USA [26], UK [33] oder dem Richtlinienentwurf aus Österreich [109] nur wenige Hinweise über den konkreten und korrekten Umgang mit ihnen gegeben. Damit die Qualitätsprüfung standardisiert abläuft und somit transparent und wiederholbar ist, werden von Rieser et al. [107] und Pestel [96] Regeln für folgende Fragen vorgeschlagen:

- Welche Klassierungskenngröße ist zu verwenden?
- Betrifft die Auswertung den gesamten Untersuchungsraum oder nur Teilräume?

- Wie viele Klassen gibt es, wie breit sollten diese sein und ändert sich die Klassengröße mit zunehmender Entfernung?
- Wie ist mit unbesetzten Klassen zu verfahren?
- Welches Gütemaß ist für den Vergleich zweier Verteilungen heranzuziehen?

#### Wahl der Klassierungskenngröße

Für eine Einteilung der Nachfrage in diskrete Klassen werden relationsbezogene Kenngrößen des Verkehrsnachfragemodells benötigt. Häufig unterscheiden sich dabei Kenngrößen einer Quelle-Ziel-Relation für die einzelnen Modi. Wird nun für jeden Modus die zugehörige Kenngrößenmatrix als Klassierungsgröße herangezogen, führt dies dazu, dass die Nachfrage unterschiedlicher Modi für die gleiche Relation in unterschiedliche Verteilungsklassen fällt. Dieser Effekt ist bei Verteilungen von multimodalen Verkehrsnachfragemodellen häufig nicht erwünscht, da z.B. kein relationsbezogener Modal-Split analysiert werden kann.

Um diesen Effekt zu vermeiden, wird eine Kenngröße benötigt, die für alle Modi identisch ist. Im Fall einer Reiseweitenverteilung ist dies die Luftlinienweite. Für die Reisezeit muss eine solche modusübergreifende Kenngröße erst berechnet werden, z.B. eine mittlere gewichtete Reisezeit.

Ganz allgemein ergeben sich bei der Wahl der Klassierungskenngröße somit folgende Optionen (siehe Tabelle 14-5).

	<b>Reiseweite</b>	<b>Reisezeit</b>
<b>Moduspezifische Kenngröße</b>	moduspezifische Reiseweite	moduspezifische Reisezeit
<b>Modusübergreifende Kenngröße</b>	Luftlinienweite oder mittlere gewichtete Reiseweite	mittlere gewichtete Reisezeit

Tabelle 14-5: Optionen bei der Wahl der Klassierungskenngröße.

Bei der Wahl der Klassierungskenngröße sind zwei weitere Punkte zu beachten:

- Werden bei der Kenngrößenberechnung die Anbindungen berücksichtigt?  
Anbindungen sind eine Modellannahme für den Teil des Weges im nicht modellierten Streckennetz. Bei einem Vergleich von zwei Verteilungen muss abgewogen werden, ob sowohl die Referenzgröße (z.B. eine Erhebung) als auch die Vergleichsgröße (z.B. das Modell) dies berücksichtigen.
- Soll der Zellbinnenverkehr ebenfalls klassiert werden?  
In makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen werden die Kenngrößen und die Nachfrage für Relationen in Matrizenform vorgehalten. Die Hauptdiagonale der Matrix bildet dabei den Zellbinnenverkehr oder intrazonalen Verkehr ab. Dieser Teil der Nachfrage wird nicht im Netz umgelegt, er weist somit also keine vom Modell bestimmten Kenngrößen (Reisezeit, Reiseweite etc.) auf, sondern es sind geeignete Kennwerte festgelegt, die einer mittleren Ortsveränderung innerhalb einer Verkehrszelle entsprechen.

Deshalb empfiehlt es sich, die Hauptdiagonale in Verteilungen nicht zu berücksichtigen. Dies entbindet den Modellersteller natürlich nicht von der Pflicht, in einer gesonderten Auswertung den Zellbinnenverkehr zu validieren. Dafür sind z.B. Analysen der Wegeanzahl im intrazonalen Verkehr

und des zellinternen Modal-Splits geeignet. Eventuell bietet sich auch eine getrennte Betrachtung für unterschiedliche Zellengrößen an.

#### Definition des zu analysierenden Raumes und der Referenzverteilung

Bei der Qualitätssicherung werden erhobene und modellierte Verteilungen für einen Raum ermittelt und verglichen. In der Regel werden die beobachteten Verteilungen aus Haushaltsbefragungen mit Wegetagebüchern abgeleitet. In diesen Haushaltsbefragungen werden auch Wege erfasst, die außerhalb des Untersuchungsraums stattfinden. Es ist daher sicherzustellen, dass die Wege, die für die Verteilung betrachtet und verglichen werden, sich auf den gleichen Raum beziehen.

Konkret bedeutet dies, dass:

- nur Wege von Einwohnern des Untersuchungsraumes untersucht werden können, die ihre Quelle und ihr Ziel in Untersuchungsraum haben,
- nur heimatgebundene Wege für die Untersuchung herangezogen werden können, da makroskopische Verkehrsnachfragemodelle keine Informationen über die Verkehrsteilnehmenden vorhalten. Zum Beispiel können Modellwege von Wohnen zur Arbeit konkret mit Erhebungsdaten verglichen werden, während Modellwege von Einkaufen zur Freizeit nicht zwangsläufig von Einwohnern des Untersuchungsraumes getätigt wurden.

In der Regel dient eine Erhebung (z.B. Haushaltsbefragung) als Referenz für die Validierung eines Verkehrsnachfragemodells oder bei Durchführung von Sensitivitätstests zur Überprüfung des Modellverhaltens. Außerdem kann aber auch der Basiszustand eines Verkehrsnachfragemodells als Referenzverteilung herangezogen werden, z.B. wenn zwei Modellzustände miteinander verglichen werden sollen.

Bei der Verwendung einer Erhebung sollte bedacht werden, dass Weg- und Zeitangaben dort häufig gerundet angegeben werden, was zu einer Häufung von „glatten“ Werten führt. Sofern die Aktivitäten der Erhebung geocodiert vorliegen, ist es zu empfehlen, dass man sich „realistischere“ Kenngrößen mithilfe dieser räumlichen Zuordnung aus einer anderen Datenquelle oder einem Verkehrsnachfragemodell holt.

#### Klassierungsmethode

Meist werden die Verteilungsklassen so bestimmt, dass eine Klassenbreite und eine Klassenanzahl vorgegeben werden. In die sich daraus ergebenden Klassen wird die Nachfrage anhand einer Klassierungskenngröße (Entfernung oder Zeit) eingeordnet. Ist die Klassenbreite hierbei über alle Verteilungsklassen gleichgroß (und die Klassenanzahl im Extremfall unendlich), wird von einer „äquidistanten“ Verteilung gesprochen. Häufig werden jedoch die größeren und nicht ausreichend besetzten Klassen zusammengefasst, sodass sich eine Skalierung mit unterschiedlich breiten Klassen ergibt.

Bei der äquidistanten Klassierung gibt es drei Fragen, die im Vorfeld beantwortet werden müssen:

- Wie breit sind die Klassen?
- Wie viele Klassen soll es insgesamt geben?

- Sollen Klassen zusammengefasst werden und wenn ja, ab welcher Klasse?

Ein anderer Klassierungsansatz gibt die Nachfragemenge in der Klasse vor und bestimmt daraus die Klassenbreite. Die entstehenden Klassen sind somit unterschiedlich breit, sie weisen jedoch alle die gleiche Besetzung auf. Diese Methode der Verteilungsklassierung wird als „äquiquantil“ bezeichnet.

Bei der äquiquantilen Klassierung stellt sich somit nur eine Frage:

- Wie viele Klassen soll es insgesamt geben?

Aufgrund dieses Vorteils hinsichtlich einer standardisierten Auswertung wird im Folgenden die äquiquantile Klassierungsmethode bevorzugt.

Der Fokus bei der äquiquantilen Klassierung steht zunächst auf der Bestimmung der Klassengrenzen, mit denen sich dann gleich besetzte Klassen ergeben. Die Berechnung der Klassengrenzen erfolgt hierbei über gewichtete Quantile, wobei die Kenngrößenmatrixelemente die Klassierungsgröße und die Nachfragematrixelemente das Gewicht darstellen.

Die Nachfrage pro Klasse kann aber durchaus von der gewünschten Besetzung abweichen. Dies kann u.a. folgende Ursachen haben:

- Eine diskrete Nachfrage muss sich nicht unbedingt komplett und gleichmäßig auf alle Klassen verteilen lassen ( $(\text{Nachfrage}) \bmod (\text{Klassenanzahl}) \neq 0$ ). Dies führt dazu, dass mindestens eine Klasse eine größere Nachfrage beinhaltet als andere Klassen. Je kleiner die Grundgesamtheit, desto größer werden die Abweichungen von theoretisch gleichbesetzten Klassen.
- Eine ungünstige Gewichtung, d.h. eine sehr starke Nachfrage auf einer Relation, kann ebenfalls zu einer Verzerrung führen.
- Durch ein Runden der Klassengrenzen vor der Klassierung kann es zu Verschiebungen der Nachfrage zwischen benachbarten Klassen kommen.

Wie eingangs erwähnt, muss auch für die äquiquantile Klassierung eine Klassenanzahl definiert werden, z.B. 10 Klassen. Dies sollte, um eine möglichst große Vergleichbarkeit zu erhalten, von einer zentralen Institution festgesetzt werden.

In Abbildung 14-9 ist eine beispielhafte Reiseweitenverteilung dargestellt. Es ist zu sehen, dass jeder Klasse die gleiche Anzahl an Wegen zugeordnet ist und der entstehende Graph somit einer approximierten Geraden entspricht.

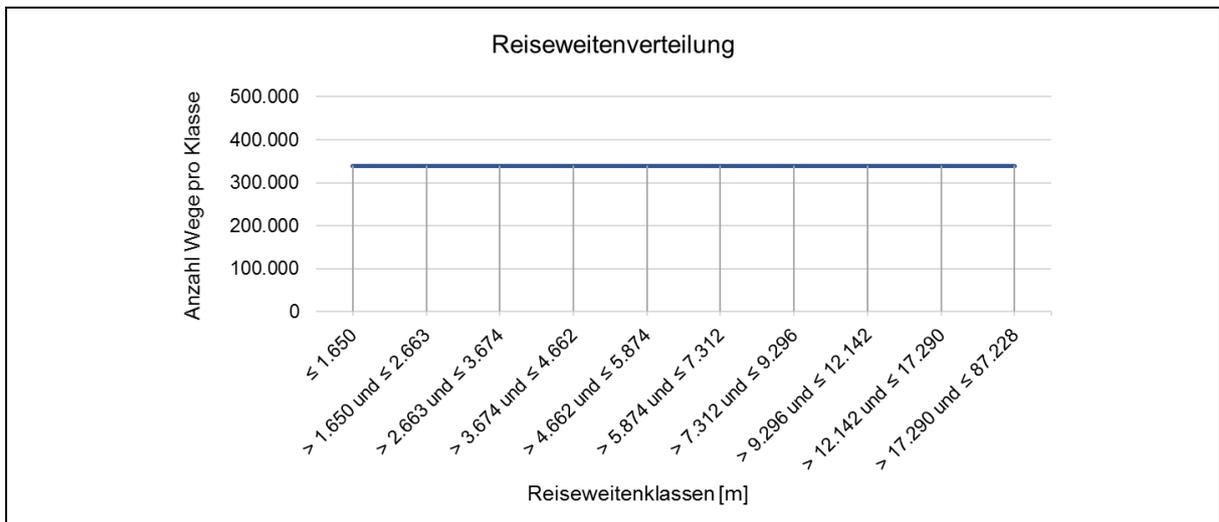


Abbildung 14-9: Beispiel einer äquiquantilen Reisweitenverteilung.

Als Grundlage für die Verteilungsklassierung können entweder die Gesamtnachfrage oder einzelne Nachfragegruppen, z.B. anhand des Wegezweckes oder des Wegezweckes und des Modus, herangezogen werden – je Einsatzzweck. Alternativ kann die Klassierung auch anhand der Verkehrsleistung (PKM) stattfinden.

Für das Vergleichen von Verteilungen ist es wichtig, dass die Klassierung einmal anhand des Referenzdatensatzes bestimmt und im Anschluss für alle Vergleichsdatensätze beibehalten wird.

#### Alternative Verfahren

Im Zuge der Qualitätssicherung sollten keine Auswertungen mit gleich breiten Klassen (äquidistante Klassen) durchgeführt werden, da sich äquiquantil klassierte Verteilungen einheitlicher erzeugen lassen. Da aber äquidistant klassierte Verteilungen in der Praxis geläufiger und daher einfacher zu interpretieren sind, können sie durchaus für Darstellungszwecke genutzt werden. Um diese Klassierungsmethode zu verwenden, müssen jedoch die Fragen nach der Klassenanzahl, der Größe der zusammengefassten Klassen und der Minimalbesetzung einer Klasse beantwortet werden. Der Richtlinienentwurf aus Österreich [109] gibt für diesen Fall Klassenbreiten vor:

- für Ballungsraumverkehre im Nahverkehrsbereich: 2 km bzw. 5 min,
- für Regional- und Fernverkehre: 5 km bzw. 10 min.

#### Weiterführende Literatur

- „QUALIVERMO (Qualitätssicherung für die Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen und Verkehrsprognosen)“ von Sammer et al. [109]
- „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen“ von Rieser et al. [107]

#### Beispiel für eine äquiquantile Klassierung

Zunächst werden die Kenngrößenwerte  $v_n$  aufsteigend sortiert. Die Nachfragewerte  $w_n$  werden entsprechend der Kenngrößensortierung sortiert. Für die Berechnung von ungewichteten Quantilen  $q_n$

wird folgende Formel herangezogen und dann durch um eine Gewichtung  $w$  zu gewichteten Quantilen  $q_{w,n}$  erweitert:

$$q_n = \frac{(n-0,5)}{N} \Rightarrow q_{w,n} = \frac{(w_{cum,n} - 0,5 \cdot w_n)}{\sum_{n=1}^N w_n}$$

Die gesuchten Klassengrenzen der Kenngrößen  $v_q$  sind das Ergebnis einer linearen Interpolation zwischen den jeweiligen gewichteten diskreten Quantilen  $q_{w,n}$ . Den sich ergebenden Klassen wird die Nachfrage zugeordnet. Das Ergebnis ist die klassierte äquiquantile Nachfrage  $w_q$ .

Folgendes Beispiel mit 20 Relationen soll dieses Vorgehen illustrieren.

$n$	$n$ -tes Element der Verteilung
$N$	Anzahl der Einzelwerte
$q_n$	$n$ -tes Quantil ( $\in (0;1]$ )
$q_{w,n}$	$n$ -tes gewichtetes Quantil ( $\in (0;1]$ )
$v_n$	$n$ -te Kenngröße
$v_q$	gewünschte Klassengrenzen der Kenngröße beim $q$ -ten Quantil
$w_n$	$n$ -tes Nachfrageelement (Gewicht)
$w_{cum,n}$	kumuliertes Gewicht beim $n$ -ten Element
$w_q$	äquiquantile Nachfrage im $q$ -ten Quantil

Gewünschte Quantile $q$	Relationsbezogene Kenngrößen $\nu$	Relationsbezogene Nachfragewerte $w$
0,1	92,0	627,0
0,2	17,0	841,8
0,3	53,0	34,1
0,4	86,0	592,2
0,5	83,0	846,6
0,6	15,0	846,6
0,7	3,0	196,6
0,8	54,0	550,4
0,9	20,0	223,6
1,0	21,0	403,7
	35,0	268,5
	90,0	255,2
	7,0	90,3
	62,0	301,6
	94,0	213,7
	37,0	506,5
	30,0	220,5
	1,0	562,5
	34,0	43,5
	43,0	814,0

Tabelle 14-6: Beispiel für die Erzeugung äquiquantiler Klassen (Eingangsgrößen).

Spalten- index →	1	2	3	4	5	6
Zeilen- index $n$	Sortierte Kenngrößen $v_n$	Analog sortierte Nachfragewerte $w_n$	0,5 * Spalte 2	Spalte 3 kumuliert	Spalte 4 - Spalte 3	Spalte 5 / $\sum(\text{Spalte 2}) =$ Nachfragequantil $q_{w,n}$
1	1,0	562,5	281,3	562,5	281,3	0,033
2	3,0	196,6	98,3	759,1	660,8	0,078
3	7,0	90,3	45,2	849,4	804,3	0,095
4	15,0	846,6	423,3	1.696,0	1.272,7	0,151
5	17,0	841,8	420,9	2.537,8	2.116,9	0,251
6	20,0	223,6	111,8	2.761,4	2.649,6	0,314
7	21,0	403,7	201,9	3.165,1	2.963,3	0,351
8	30,0	220,5	110,3	3.385,6	3.275,4	0,388
9	34,0	43,5	21,8	3.429,1	3.407,4	0,404
10	35,0	268,5	134,3	3.697,6	3.563,4	0,422
11	37,0	506,5	253,3	4.204,1	3.950,9	0,468
12	43,0	814,0	407,0	5.018,1	4.611,1	0,546
13	53,0	34,1	17,1	5.052,2	5.035,2	0,597
14	54,0	550,4	275,2	5.602,6	5.327,4	0,631
15	62,0	301,6	150,8	5.904,2	5.753,4	0,682
16	83,0	846,6	423,3	6.750,8	6.327,5	0,750
17	86,0	592,2	296,1	7.343,0	7.046,9	0,835
18	90,0	255,2	127,6	7.598,2	7.470,6	0,885
19	92,0	627,0	313,5	8.225,2	7.911,7	0,938
20	94,0	213,7	106,9	8.438,9	8.332,1	0,987
$\Sigma$		<b>8.438,9</b>				

Tabelle 14-7: Beispiel für die Erzeugung äquiquantiler Klassen (Berechnung).

Gewünschte Quantile $q$	Kenngrößenklassen- grenzen $v_q$	Absolute Nachfrage je Klasse $w_q$ [-]	Relative Nachfrage je Klasse $w_q$ [%]
0,1	7,7	849,4	10,1%
0,2	16,0	846,6	10,0%
0,3	19,3	841,8	10,0%
0,4	33,0	847,8	10,0%
0,5	39,4	818,5	9,7%
0,6	53,1	848,1	10,0%
0,7	67,6	852,0	10,1%
0,8	84,8	846,6	10,0%
0,9	90,6	847,4	10,0%
1,0	94,0	840,7	10,0%

Tabelle 14-8: Beispiel für die Erzeugung äquiquantiler Klassen (Ergebnis).

## **Anlage 3      Checklisten**

### **Checkliste: Eingangsdaten von Verkehrsnachfragemodellen**

Dieses Dokument enthält eine Checkliste der Daten, die für die Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells erforderlich sind. Eine detaillierte Beschreibung aller Eingangsdaten und möglicher Datenquellen findet sich im Forschungsbericht in Kapitel 6 „Datengrundlagen und Datenquellen“.

### **Checkliste: Einsatzbereiche von Verkehrsnachfragemodellen**

Dieses Dokument enthält eine Checkliste auf Basis der Einsatzbereiche, aus denen sich Anforderungen für die Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells ergeben. Eine detaillierte Beschreibung aller Einsatzbereiche und Modellergebnisse findet sich im Forschungsbericht in Kapitel 4 „Einsatzbereiche von Verkehrsnachfragemodellen und gewünschte Modellergebnisse“.

### **Checkliste: Anforderungen an die Modellierungssoftware**

Ein Verkehrsnachfragemodell wird mit Hilfe einer Modellierungssoftware implementiert. Dieses Dokument enthält eine Checkliste für die Modellierungssoftware. Diese Checkliste kann entweder genutzt werden, um die Anforderungen eines zu erstellenden Verkehrsnachfragemodells an eine Modellierungssoftware zu dokumentieren oder um die Eigenschaften verschiedener Produkte zu vergleichen. Eine detaillierte Beschreibung der Anforderungen an eine Modellierungssoftware findet sich im Forschungsbericht in Kapitel 7 „Anforderungen an die Modellierungssoftware“.

## **Anlage 4      Dokumentationsvorlagen**

Die Dokumentation eines Verkehrsnachfragemodells ist eine notwendige Voraussetzung, um der Forderung nach Transparenz und Reproduzierbarkeit gerecht zu werden. Eine Modelldokumentation hat zum Ziel, den Modellaufbau (inklusive aller Annahmen und Teilmodelle) so zu dokumentieren, dass Modellanwendern und Ergebnisnutzern mit dem Modell arbeiten und die Ergebnisse nutzen können. Dazu gehört auch, die Einsatzbereiche und die Einschränkungen des Modells klar zu benennen. Das Modellhandbuch wird für folgende Zielgruppen erstellt:

- Modellersteller, d.h. Personen, die das Nachfragemodell verändern oder weiterentwickeln wollen bzw. das Modell in der Tiefe verstehen wollen.
- Modellanwender, d.h. Personen, die mit einem kalibrierten Modell arbeiten wollen.
- Ergebnisnutzer, d.h. Personen, die nur mit den Ergebnissen des Modells arbeiten, ohne das Modell vorliegen zu haben bzw. ohne Fachkenntnis im Bereich der Verkehrsmodellierung.

Die Dokumentation des Verkehrsmodells umfasst

- ein Modellhandbuch und
- einen Kalibrierungs- und Validierungsbericht.

Für beide Dokumentationsarten werden Vorlagen bereitgestellt.

## **Anlage 5      Tool zur Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen**

Um eine angemessene Güte eines Verkehrsnachfragemodells zu gewährleisten, ist eine möglichst standardisierte Qualitätssicherung erforderlich. Dazu werden mit dem Modell errechnete Werte und gemessene Werte mit geeigneten Gütemaßen überprüft. Als Kontrolldaten dienen personenbezogene Daten zum Mobilitätsverhalten aus Befragungen und netzbezogene Daten zu Verkehrsstärken an Zählstellen und Fahrtzeiten zwischen ausgewählten Punkten im Netz. Im Rahmen dieses Projektes wurde dazu ein Qualitätssicherungstool basierend auf Microsoft Excel entwickelt.

Das Qualitätssicherungstool kann entweder genutzt werden, um zulässige Abweichungen zwischen Modellwerten und Messwerten zu visualisieren oder um konkrete Auswertungen durchzuführen.

## Anlage 6 Modellspezifikationsgenerator

Der Modellspezifikationsgenerator ist ein Tool, das Einsatzbereiche und gewünschte Modellergebnisse erfasst und daraus Anforderungen an die Modellerstellung ableitet. Die Anforderungen können als Grundlage für die Erstellung einer Modellspezifikation oder als Grundlage für die Erstellung einer Leistungsbeschreibung genutzt werden. Der Modellspezifikationsgenerator ist mit Microsoft Excel und VBA erstelltes Programm. Er baut auf einem Word-Template auf und ergänzt das Dokument durch Textbausteine. Die Textbausteine werden regelbasiert ausgewählt.

### Start des Modellspezifikationsgenerators

Um den Modellspezifikationsgenerator zu starten, wird die entsprechende Excel-Datei geöffnet. Im Tabellenblatt „Start“ findet sich eine Schaltfläche „Start“, mit der die Benutzeroberfläche des Modellspezifikationsgenerators gestartet wird.

### Allgemeine Angaben

Im oberen Teil des Fensters der Benutzeroberfläche können allgemeine Angaben zum Namen des Modellvorhabens und zum Modellbesitzer bzw. zum Auftraggeber gemacht werden (siehe Abbildung 14-10).

Abbildung 14-10: Modellspezifikationsgenerator – Allgemeine Angaben.

Unter den allgemeinen Angaben ist ein Fenster mit mehreren Tabs für weitere Einstellungen.

Abbildung 14-11 zeigt die Schaltflächen im unteren Bereich der Benutzeroberfläche:

- Zurück und Vor: Navigation zwischen den vier Tabs.
- Bericht erstellen: Basierend auf den aktuellen Eingabedaten wird ein Bericht erstellt.
- Speichern: Die aktuellen Eingabedaten werden in der Exceldatei gespeichert.
- Laden: Die Eingabedaten der Exceldatei werden in die Benutzeroberfläche übernommen.
- Initialisieren: Zurücksetzen der Eingabedaten.

Abbildung 14-11: Modellspezifikationsgenerator – Teil „Navigation, Erstellen eines Berichts, Speicher/Laden/Initialisieren“.

### Einstellungen „Siedlungsstruktur“

Im ersten Tab können Einstellungen der Siedlungsstruktur gemacht werden (Abbildung 14-12):

- zur Anzahl der Einwohner und der Arbeitsplätze,
- zur Ausdehnung des Planungsraumes,

- ob ein übergeordnetes Modell vorhanden ist und
- welche Bedeutung der Güterverkehr im Planungsraum hat.

Siedlungsstruktur | Veranlassung der Modellerstellung | Zu evaluierende Maßnahmen | Gewünschte Kenngrößen als Modelloutput

Anzahl Einwohner im Planungsraum

Anzahl Arbeitsplätze im Planungsraum

Ausdehnung Planungsraum

National bzw. überregional  
 Regional  
 Städtisch  
 Teilstädtisch

Übergeordnetes Modell vorhanden

Unternehmen mit Güterverkehr im Planungsraum haben

geringe Bedeutung (geringer Anteil und keine singuläre Schwerverkehrserzeuger)  
 mäßige Bedeutung  
 hohe Bedeutung (hoher Schwerverkehrsanteil oder singuläre Schwerverkehrserzeuger)

Abbildung 14-12: Modellspezifikationsgenerator – Teil „Siedlungsstruktur“.

### Einstellungen „Veranlassung der Modellerstellung“

Wie in Abbildung 14-13 dargestellt, können in diesem Tab Anlässe der Modellerstellung spezifiziert werden. Dabei kann es vorkommen, dass Einstellungen inaktiv sind, da sie zu Erfüllung der bereits getroffenen Einstellung vonnöten sind.

Siedlungsstruktur | Veranlassung der Modellerstellung | Zu evaluierende Maßnahmen | Gewünschte Kenngrößen als Modelloutput

Input für Planungsverfahren

Strategische Planung, Bedarfsplanung (BVWP, VEP, NVP)  
 Vorplanung  
 Entwurfsplanung, Planfeststellung, Genehmigungsplanung  
 Flächennutzungsplan  
 Bebauungsplanung  
 Lärminderungsplanung  
 Luftreinhaltungsplanung  
 Linienerechnung

Input für Formales Berechnungsverfahren

Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs  
 RWS  
 HBS - Autobahn  
 HBS - Landstraße  
 HBS - Stadtstraße  
 RIN  
 RLS 90  
 HBEFA

Kein formales Verfahren

Kein formales Verfahren

Abbildung 14-13: Modellspezifikationsgenerator – Teil „Veranlassung der Modellerstellung“.

## Einstellungen „Zu evaluierende Maßnahmen“

Abbildung 14-14 zeigt die Einstellungsmöglichkeiten für mögliche Maßnahmen, die das Modell abbilden können soll. Auch hier kann es vorkommen, dass Einstellungen inaktiv sind, da sie zu Erfüllung der bereits getroffenen Einstellung vonnöten sind.

The screenshot shows the 'Zu evaluierende Maßnahmen' tab with the following sections and options:

- Siedlungsstrukturell**
  - Demografische Effekte
  - Erweiterung / Planung von Wohn-, Gewerbe- und Industriegebieten
  - Singulärer Verkehrserzeuger (z.B. Flughafen, Messe, Freizeitpark, Fußballstadion)
- Infrastrukturell**
  - Straßenneubau, -ausbau, -rückbau
  - Liniennetzplanung ÖV (Linienweg)
  - Bau von Park + Ride Verknüpfungspunkten
  - Radwegebau, -ausbau, -rückbau
  - Fußwegeinfrastruktur
- Ordnungspolitisch**
  - Lkw-Durchfahrtsverbote
  - Änderungen der zulässigen Geschwindigkeit
  - Umweltzonen
  - Parkraummanagement
- Kostenbeeinflussend**
  - Fahrpreisänderungen / Tarif
  - Straßenbenutzungsgebühren
  - Parkraumbewirtschaftung
- Betrieblich (ÖV)**
  - Taktveränderung
  - Differenzierte Fahrplanänderung
  - Fahrzeugeinsatz
- Verkehrstechnisch (MIV)**
  - Dimensionierung von Knotenpunkten und Verflechtungen
  - Verkehrsleitsysteme
  - Verkehrsmanagement
- Fahrzeugtechnisch (MIV)**
  - Änderung der Fahrzeugflottenzusammensetzung
- Bewusstseinsbildend/Mobilitätsmanagement**
  - Mobilitätskostenanalyse
  - Marketing

Abbildung 14-14: Modellspezifikationsgenerator – Teil „Zu Evaluierende Maßnahmen“.

## Einstellungen „Gewünschten Kenngrößen als Modelloutput“

Im letzten Tab können die gewünschten Ergebniskenngrößen definiert werden, inklusive ihrer Differenzierung (siehe Abbildung 14-15). Auch hier kann es vorkommen, dass Einstellungen inaktiv sind, da sie zu Erfüllung der bereits getroffenen Einstellung vonnöten sind.

The screenshot shows the 'Gewünschte Kenngrößen als Modelloutput' tab with the following sections and options:

- Anzahl der Wege**
  - Pkw
  - Pkw-Selbstfahrer, Pkw-Mitfahrer
  - ÖV
  - Rad
  - Fuß
  - Lkw
- Verkehrsstärke**
  - Pkw
  - Pkw-Selbstfahrer, Pkw-Mitfahrer
  - ÖV
  - Rad
  - Fuß
  - Lkw
- Streckengeschwindigkeit**
  - Streckengeschwindigkeit
  - Personenkilometer
  - Umsteigehäufigkeit
  - Linienbeförderungsfälle
  - Betriebskosten ÖV
  - Erlöse ÖV
  - Einnahmen MIV (Maut, Parken)
  - Fahrzeugkilometer
  - Kraftstoffverbrauch
  - Schadstoffemission
  - Lärmemission
  - Motorisierungsgrad, Pkw-Verfügbarkeit
  - Zeitkartenbesitz
- Tageszeitliche Auflösung der Kenngrößen**
  - stündlich
  - ausgewählte Zeitscheiben (Spitzenstunde, Hauptverkehrszeit, Nacht)
  - Tag
- Differenzierung nach Verkehrstagen**
  - nur Werktag (Schultage, Mo-Fr)
  - feinere Differenzierung (Sa, So, Urlaub)
  - Tage mit besonderen Veranstaltungen (z. B. Messe, Fußballspiele)
- Prognosehorizont**
  - Ist-Zustand
  - wenige Stunden (Kurzfristprognose für Verkehrsmanagement)
  - bis 5 Jahre
  - > 15 Jahre

Abbildung 14-15: Modellspezifikationsgenerator – Teil „Gewünschte Kenngrößen als Modelloutput“.

**Erstellung eines Berichts**

In der Fußzeile der Benutzeroberfläche befindet sich ein Knopf „Bericht erstellen“. Durch Drücken des Knopfes wird automatisiert ein Bericht in Microsoft Word erzeugt. Die Vorlage, auf die der Modellspezifikationsgenerator dabei zurückgreift, muss im selben Verzeichnis wie die Excel-Datei liegen.

**Anlage 7      Vorlage einer Leistungsbeschreibung**

Nachfolgend ist ein Ergebnis des Modellspezifikationsgenerators dargestellt. Das Ergebnis ergibt sich mit den Einstellungen, die in Anlage 6 dargestellt sind. Dieses Dokument kann dann als Grundlage für die Erstellung einer Leistungsbeschreibung genutzt werden.

**FE 70.919/2015**

**Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle**  
**Anforderungen an das Verkehrsnachfragemodell**  
**„BMVI Testfall“**

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

**Stand: 18.11.2019**

Friedrich, M.; Pestel, E.; Schiller, C.; Simon, R.; Heidl, U.; Pillat, J.: Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle.  
FE-Projekt 70.893/2014, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2019  
Version 1.0

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Anlass der Modellerstellung</b>	<b>4</b>
1.1 Einsatzbereiche	4
1.2 Modellergebnisse	4
<b>2 Räumliche Abgrenzung</b>	<b>7</b>
<b>3 Bezugszeitraum</b>	<b>7</b>
<b>4 Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur</b>	<b>8</b>
<b>5 Abbildung des Verkehrsangebots</b>	<b>8</b>
5.1 Netz des Straßenverkehrs	8
5.2 Netz des öffentlichen Verkehrs	9
<b>6 Abbildung der Verkehrsnachfrage</b>	<b>9</b>
6.1 Segmentierung der Verkehrsnachfrage	9
6.2 Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodell	10
6.3 Verkehrserzeugung	10
6.4 Verkehrsverteilung	10
6.5 Verkehrsmoduswahl	11
6.6 Umlegung IV	11
6.7 Umlegung ÖV	11
6.8 Abfahrtszeitwahl	11
<b>7 Externer Verkehr und Wirtschaftsverkehr</b>	<b>12</b>
7.1 Externer Verkehr	12
7.2 Wirtschaftsverkehr	12
<b>8 Prognose</b>	<b>12</b>
<b>9 Validierung des Modells</b>	<b>13</b>
9.1 Überprüfung der Modellgenauigkeit	13
9.2 Einzelwerte	13
9.3 Verteilungen	14
9.4 Zielwerte für die Validierung	15
9.5 Überprüfung des Modellverhaltens	17
<b>10 Verfügbare Daten</b>	<b>18</b>
<b>11 Modellspezifikation und Dokumentation</b>	<b>18</b>
11.1 Modellspezifikation	18
11.2 Modelldokumentation	18
11.3 Übergabe des Modells	19
<b>12 Projektorganisation</b>	<b>19</b>
12.1 Arbeitsschritte und Zeitplan	19
12.2 Meilensteinberichte und Projektgespräche	20

### Hinweise zum Dokument

Das vorliegende Dokument enthält Anforderungen an den Aufbau und die Validierung eines Verkehrsnachfragemodells. Die Anforderungen können als Grundlage für die Erstellung einer Modellspezifikation oder einer Leistungsbeschreibung genutzt werden. Die Inhalte des Dokuments werden mit einem Modellspezifikationsgenerator erstellt. Dieser Modellspezifikationsgenerator baut auf einer Microsoft Word-Vorlage auf und ergänzt das Dokument durch Textbausteine. Die Textbausteine werden regelbasiert ausgewählt. Grundlage für die Auswahl sind allgemeine Angaben zum Anlass der Modellerstellung:

- Angaben zur Struktur des Untersuchungsraumes,
- Angaben zur Veranlassung der Modellerstellung,
- Angaben zu Entwicklungen und Maßnahmen, die untersucht werden sollen,
- Festlegung von Kenngrößen, die mit dem Modell berechnet werden sollen.

Der auf diese Weise erstellte Text muss dann vor der weiteren Verwendung geprüft und überarbeitet werden. Der Text stellt nur einen Textvorschlag dar, die Verantwortung für die Inhalte liegt beim Nutzer des Modellspezifikationsgenerators.

## 1 Anlass der Modellerstellung

Das vorliegende Dokument enthält die Anforderungen an den Aufbau und die Validierung des Verkehrsnachfragemodells „BMVI Testfall“. Die Anforderungen an das Modell ergeben sich aus dem Anlass der Modellerstellung, den zu untersuchenden Maßnahmen und den gewünschten Kenngrößen.

### 1.1 Einsatzbereiche

Das Verkehrsnachfragemodell sollte für folgende Planungsaufgaben genutzt werden:

- Strategische Planung, Bedarfsplanung (BWVP, VEP, NVP)
- Entwurfsplanung, Planfeststellung, Genehmigungsplanung
- Lärminderungsplanung
- Luftreinhalteplanung
- Linienerechnung im ÖV

Die Ergebnisse des Verkehrsnachfragemodells sollten Eingangswerte für folgende Regelwerke bereitstellen:

- Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen RWS
- Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS - Teil Stadtstraßen
- Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen RLS 90

Das zu erstellende Verkehrsnachfragemodell sollte die Wirkungen folgender Entwicklungen und Maßnahmen ermitteln:

- Wirkung demografischer Entwicklungen.
- Wirkungen von baulichen Maßnahmen (Neubau, Ausbau, Rückbau) im Straßennetz.
- Wirkungen von Maßnahmen im ÖV (Liniennetzplanung).
- Wirkungen von Lkw-Durchfahrtsverboten.
- Wirkungen von Änderungen bei Fahrpreisen und Tarifstrukturen im ÖV.
- Wirkung von Straßenbenutzungsgebühren.
- Wirkungen auf den erforderlichen Fahrzeugeinsatz (Anzahl Fahrzeuge).
- Wirkungen der Verkehrssteuerung an Knotenpunkten.
- Wirkungen von Verkehrsleitsystemen.
- Wirkungen eines Verkehrsmanagements.

### 1.2 Modellergebnisse

Für die Einsatzbereiche des Modells sind folgende Kenngrößen zur Bewertung der Wirkungen von besonderer Bedeutung:

- die Zahl der Wege im Personenverkehr, differenziert nach Modus (Pkw, Pkw-Selbstfahrer, Pkw-Mitfahrer, ÖV)
- die Zahl der Fahrten mit dem Modus Lkw
- die Verkehrsstärke je Netzelement, differenziert nach Modus (Pkw, ÖV, Lkw)
- die Streckengeschwindigkeit
- die Personenkilometer im ÖV
- die Umsteigehäufigkeit
- die Zahl der Linienbeförderungsfälle je Linie

Verkehrsnachfragemodell „BMVI Testfall“

5

- die Betriebskosten im ÖV
- die Erlöse im ÖV
- die Einnahmen im MIV (Maut, Parken)
- die Fahrzeugkilometer je Netzelement
- der Kraftstoffverbrauch je Netzelement
- die Schadstoffemission je Netzelement
- die Lärmemissionen je Netzelement
- der Zeitkartenbesitz

Alle Werte sind für folgende Tagesarten zu berechnen:

- Alle Werte sollten für einen normalen Werktag (Mo bis Fr, Schulzeit, Vorlesungszeit) ermittelt werden.

Das Verkehrsmodell soll die Kenngrößen mit folgendem Zeitbezug bereitstellen:

- Das Verkehrsnachfragemodell soll neben den Tageswerten zusätzlich Stundenmatrizen für jeden Modus sowie stündliche Verkehrsstärken pro Netzelement liefern.

Diese Kenngrößen sind im Modell auf geeigneten Ebenen zu hinterlegen:

- Relationsbezogene Ergebnisse:
  - Kenngrößenmatrizen
  - Nachfragematrizen
- Netzelementbezogene Ergebnisse:
  - Strecken und Abbieger: Verkehrsstärke, Auslastung, Fahrtzeit
  - Haltestellen: Verkehrsstärken für Ein-, Aus- und Umsteiger, Wartezeiten
  - Linien: Einsteiger, Aussteiger, Fahrgäste, Personenkilometer, Auslastung
- Aggregierte Ergebnisse:

Sie umfassen Kenngrößen für den gesamten Untersuchungsraum, für den gesamten Planungsraum oder für Teilräume oder für Mengen von Netzelementen (z.B. für ein ÖV-Verkehrssystem oder für eine Straßenklasse). Tabelle 1 zeigt die gewünschten Modellergebnisse, die als aggregierte Werte mit dem Modell ermittelt werden sollen.

## Verkehrsnachfragemodell „BMVI Testfall“

6

Kenngröße	Inhaltliche Differenzierung	Räumliche Differenzierung			
		mit externem Verkehr		ohne externen Verkehr	
		Untersuchungsraum	Planungsraum	Untersuchungsraum	Planungsraum
Verkehrsaufkommen [Anzahl Wege]	• alle Personen			M	M
	• Wegezweck			M	M
	• Personengruppe × Wegezweck			M	M
	• Modus 1 ①			M	M
	• Modus × Personengruppe			M	M
	• Modus 1 × Wegezweck			M	M
Verkehrsleistung [Personenkilometer] oder [Fahrzeugkilometer]	• alle Personen			M	M
	• Modus 1 ②			M	M
	• Modus 2	U	U	U ③	U ③
	• Personengruppe			M	M
	• Wegezweck			M	M
	• Straßenklasse	U	U	U ③	U ③
Verkehrszeitaufwand [Personenstunden] oder [Fahrzeugstunden]	• alle Personen			M	M
	• Modus 1			M	M
	• Modus 2	U	U	U ③	U ③
	• Personengruppe			M	M
	• Wegezweck			M	M
	• Straßenklasse	U	U	U ③	U ③
mittl. Reiseweite pro Weg [km]	• Wegezweck			M	M
mittl. Reisezeit pro Weg [min]	• Wegezweck			M	M
mittl. Wegezahl pro Person [Anzahl Wege]	• alle Personen			M	M
	• Personengruppe			M	M
mittl. Reiseweite pro Person [km]	• alle Personen			M	M
	• Personengruppe			M	M
mittl. Reiseweite pro Person [km]	• alle Personen			M	M
	• Personengruppe			M	M

**Legende**

M Kenngröße ist das Ergebnis einer Matrixauswertung. Es werden nur Wege mit Quelle und Ziel im jeweiligen Raum ausgewertet. Der Zellbinnenverkehr ist Bestandteil der Kenngröße.

U Kenngröße ist das Ergebnis einer Umlegung und einer Aufsummierung der Kenngrößen über alle Netzelemente (Strecken, Abbieger, Anbindung) im jeweiligen Raum. Der Zellbinnenverkehr ist nicht Bestandteil der Kenngröße.

Die Kenngrößen einer Matrixauswertung M und einer Umlegungsauswertung U können nur dann verglichen werden, wenn der Zellbinnenverkehr nicht berücksichtigt wird und wenn die Kenngrößenmatrix nach der Umlegung nochmal neu berechnet wird.

① Aus diesen Kenngrößen kann der wegebezogene Modal-Split berechnet werden.

② Aus diesen Kenngrößen kann der verkehrsleistungsbezogene Modal-Split berechnet werden.

③ Diese Auswertung ist nur möglich, wenn der externe Verkehr als eigene Nachfragegruppe umgelegt wird.

**Ausprägungen des Modus**

- Modus 1: Fuß, Rad, ÖV, Pkw-Selbstfahrer und Pkw-Mitfahrer:  
Für diese Auswertungen ist keine Umlegung erforderlich; ausgewertet werden alle Wege mit Quelle und Ziel im jeweiligen Raum.
- Modus 2: ÖV, Pkw-Selbstfahrer, Lkw:  
Für diese Auswertungen ist eine Umlegung erforderlich, um die Verkehrsleistung und den Verkehrszeitaufwand pro Raum zu ermitteln.

Tabelle 1: Aggregierte Ergebnisse, die das Verkehrsnachfragemodell bereitstellen soll.<sup>1</sup><sup>1</sup> Die Inhalte dieser Tabelle müssen an die Gegebenheiten des Modells angepasst werden.

## 2 Räumliche Abgrenzung

Der Planungsraum umfasst den Raum, in dem Maßnahmen untersucht werden. Der Untersuchungsraum beinhaltet neben dem Planungsraum den Einflussraum, in dem die Maßnahmen Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage haben. Der Außenraum dient zur Abbildung der verkehrlichen Interaktion des Untersuchungsraums mit dem „Rest der Welt“. Bild 1 zeigt den Planungs- und Einflussraum.

Der Planungsraum umfasst einen Raum mit rund 2.000.000 Einwohnern und 1.000.000 Arbeitsplätzen.

Der Untersuchungsraum sollte die Region und zusätzlich den wesentlichen Pendlereinzugsbereich der Region beinhalten.

Das Verkehrsnachfragemodell sollte den Binnenverkehr des Untersuchungsraums berechnen.



Bild 1: Planungs- und Einflussraum.

Weitere Informationen zur räumlichen Abgrenzung finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.2.

## 3 Bezugszeitraum

### Analyse- und Prognosezeitpunkt

Bezugsjahr für den Analysezustand ist das Jahr [20JJ], wobei Eingangsdaten, insbesondere die Zählraten und Strukturdaten je nach Verfügbarkeit z. T. aus zurückliegenden Jahren verwendet werden müssen. Grundlage für das Angebot im ÖV ist die Fahrplanperiode [12/20JJ bis 12/20JJ]. Basierend auf dem Modell des Analysezustands soll ein Prognosenußfall für das Jahr [20JJ] erstellt werden.

### Verkehrstage

Das Modell sollte folgende Verkehrstage abbilden:

- Werktag Schule (Montag bis Freitag, DTVw5)

Weitere Informationen zum Bezugszeitraum finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 4.2.

### Modellfälle

Mit dem zu erstellenden Verkehrsnachfragemodell sollten folgende Modellfälle abgebildet werden:

- Analysefall
- Bezugsfall
- Planfälle

## 4 Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur

Die Anzahl der Verkehrszellen im Planungsraum sollte 500 bis 700 betragen. Dieser Wertebereich ergibt sich daraus, dass in einem regionalen Modell die Zahl der Einwohner pro Zelle im Planungsraum zwischen 3.000 und 4.000 liegen soll.

Die Anzahl der Verkehrszellen im Untersuchungsraum inkl. Planungsraum sollte 800 bis 1.000 betragen. Dieser Wertebereich ergibt sich daraus, dass die Zellenzahl im Einflussraum >50% der Zellen im Planungsraum betragen und die Einwohner pro Zelle zwischen 5.000 und 8.000 liegen soll.

Bei der Festlegung der Verkehrszellen sollen folgende Regeln beachtet werden:

- Im Planungsraum sollte jede Gemeinde durch mindestens eine Verkehrszelle repräsentiert werden.
- In kreisfreien Städten des Planungsraums sollte jeder Stadtteil durch mindestens eine Verkehrszelle abgebildet werden.
- Im Einflussraum können mehrere Gemeinden zu einer Verkehrszelle zusammengefasst werden.
- Eine Zelle sollte maximal eine Haltestelle des Schienenverkehrs umfassen.
- Die Abgrenzung der Zellen sollte sich an den verfügbaren Siedlungsstrukturdaten orientieren. Außerdem sollten organisatorische Raumeinheiten (Gemeindegrenzen, Stadtteile), natürliche Grenzen (Flüsse) und trennende Verkehrswege (Autobahnen, Schienenwege) berücksichtigt werden.
- Verkehrszellen sollten im gesamten Untersuchungsraum ähnliche Größenordnungen bei den Einwohner- und Arbeitsplatzzahlen haben. Verkehrszellen können mit zunehmender Entfernung vom Planungsraum nach außen größer werden. Sprünge in der Zellengröße zwischen Planungsraum und Einflussraum sollten vermieden werden.
- Für jede Verkehrszelle sollte neben den Zellgrenzen die Siedlungsflächen als Polygonobjekte eingepflegt werden.
- Für Flächen, die im Prognosezeitraum entwickelt werden sollen, sind bereits im Analysefall Verkehrszellen vorzusehen.
- Im Planungsraum sollte die Einspeisung nicht direkt in das Hauptstraßennetz erfolgen.

Weitere Informationen zur Abbildung der Raum- und Siedlungsstruktur finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.3.

## 5 Abbildung des Verkehrsangebots

### 5.1 Netz des Straßenverkehrs

#### Enthaltene Straßenklassen bzw. Wegenetz

Im Netzmodell sollten innerhalb des Planungsraums folgende Straßenklassen enthalten sein:

- Bundesfernstraßen: Bundesautobahnen und Bundesstraßen.
- Außerörtliche Hauptverkehrsstraßen: Landstraßen und Kreisstraßen der Verbindungsfunktionsstufe I bis IV.
- Innerörtliche Hauptverkehrsstraßen: Innerörtliche Straßen mit Verbindungsfunktion.

#### Modellierung der Knotenpunkte

Es sollten auslastungsabhängige Abbiege- und Knotenwiderstände in Abhängigkeit vom Knotentyp modelliert werden. Dazu sind geeignete CR-Funktionen zu nutzen.

### **Fahrzeugklassen für den motorisierten Verkehr**

Das Modell sollte die Verkehrsstärken nach Fahrzeugklassen differenzieren. Die Differenzierung sollte so erfolgen, dass Fahrzeuge entsprechend einer Mautspezifikation bzw. nach Emissionsklassen unterscheidbar sind.

Weitere Informationen zur Abbildung des Straßennetzes finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.4.2.

## **5.2 Netz des öffentlichen Verkehrs**

### **Systeme des öffentlichen Verkehrs**

Das ÖV-Netzmodell sollte innerhalb des Planungsraums die folgenden ÖV-Systeme enthalten:

- Fernverkehrsnetz
- Regionalverkehrsnetz Schiene + hochwertige Busse
- Ergänzendes Regionalverkehrsnetz
- Städtischer ÖPNV

### **Differenzierung des öffentlichen Verkehrs**

Das ÖV-Angebot sollte den Fernverkehr und den Regionalverkehr enthalten. Eine Abbildung des kompletten Nahverkehrsangebotes ist nicht notwendig.

### **Fahrplanangebot**

Der öffentliche Verkehr ist durch Linienwege, Fahrtzeiten und den Fahrplan mit An- und Ankunftszeiten abzubilden.

Darüber hinaus sollten bei der Modellierung des ÖV-Angebots folgende Dinge beachtet werden:

- Abbildung der Tarife
- Fahrzeugtypen bzw. Zugtypen mit Kapazität und Betriebskostensätzen

### **Park+Ride**

Die explizite Abbildung des Park+Ride-Verkehrs ist nicht notwendig.

Weitere Informationen zur Abbildung des ÖV-Angebots finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.4.3.

## **6 Abbildung der Verkehrsnachfrage**

### **6.1 Segmentierung der Verkehrsnachfrage**

#### **Differenzierung der Personengruppen**

Bei der Segmentierung der Personengruppen sollten mindestens die Gruppen Schüler, Azubis, Studenten, Erwerbstätige mit Pkw, Erwerbstätige ohne Pkw, Nichterwerbstätige mit Pkw, Nichterwerbstätige ohne Pkw, Rentner < 75 und Rentner > 75 unterschieden werden.

Weitere Informationen zur Personengruppeneinteilung finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.5.1.

### Differenzierung der Aktivitäten

Die abgebildeten Aktivitäten sollten mindestens Arbeit-Vollzeit, Arbeit-Teilzeit, Bildung, Einkaufen, Private Erledigung, Freizeit, Bringen / Holen sowie Sonstige Erledigungen unterscheiden.

Weitere Informationen zur Wegezweckdifferenzierung finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.5.1.

## 6.2 Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodell

Die Verkehrsmittelverfügbarkeit ist explizit und prognosefähig in das Modell einzubauen. Sie sollte sensitiv hinsichtlich der zu untersuchenden Maßnahmen sein.

## 6.3 Verkehrserzeugung

### Erzeugungsmodell

Das Verkehrserzeugungsmodell soll folgende Anforderungen erfüllen:

- Die Verkehrserzeugung sollte differenziert nach Personengruppen und Wegezwecken erfolgen.
- Es sollte die Verwendung eines Aktivitätenkettenmodells angestrebt werden, das Pflicht- und Wahlaktivitäten unterscheidet.
- Die im Modell verwendeten Strukturgrößen, Produktionsraten, Anziehungsraten und die Untersuchungsraumanteile sollten vom Modellersteller für jede Personengruppe und jeden Wegezweck offengelegt werden, so dass die Verkehrserzeugung von Modellnutzern reproduziert werden kann.
- Die Verkehrserzeugung muss berücksichtigen, dass Zellen am Rand des Untersuchungsraums pro Person weniger Wege erzeugen, die Quelle und Ziel im Untersuchungsraum haben, als Zellen im Kern des Untersuchungsraums. Am Rand entfällt ein größerer Anteil der Wege auf Wege in den Außenraum. Deshalb sind für jede Zelle und für jeden Wegezweck die Anteile der Wege mit Quelle und Ziel im Untersuchungsraum zu bestimmen. Dieser Anteil wird Untersuchungsraumanteil genannt. Er wird für den produzierten und angezogenen Verkehr differenziert.
- Es gibt Aktivitätenorte (z.B. Kinderbetreuung, Ausbildung), die vorrangig im Umkreis des Wohnorts (z.B. in der Gemeinde, im Landkreis) liegen. Bei Wegezwecken mit diesen teilräumlichen Bindungen muss im Rahmen der Verkehrserzeugung geprüft werden, ob die Siedlungsstrukturdaten von Einwohnern (z.B. Zahl der Schüler) und Aktivitätenorten (z.B. Zahl der Schulplätze) in Teilräumen übereinstimmen.

### Singuläre Verkehrserzeuger

Die Abbildung singulärer Verkehrserzeuger ist für den Planungsraum von besonderer Bedeutung. Es sind jene Attraktionspotenziale zu identifizieren, deren Verkehrsaufkommen sich nicht allein aus den vorhandenen Strukturdaten erklärt. Das können z.B. Bahnhöfe oder Flughäfen sein (erhöhtes Potenzial für Holen / Bringen), große Veranstaltungshallen oder Freizeitparks.

## 6.4 Verkehrsverteilung

### Zielwahlmodell

Die Zielwahl muss abhängig vom Verkehrsangebot sein und unter der Beachtung von Randsummenbedingungen durchgeführt werden. Zielwahl- und Moduswahl sollen simultan erfolgen. Gewachsene Strukturen sollen für Arbeitswege durch die Einbeziehung einer empirischen Matrix (Pendlermatrix) in die Nutzenfunktion berücksichtigt werden.

Weitere Informationen zur Zielwahl finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.1.3 und 5.1.5.

## 6.5 Verkehrsmoduswahl

### Modale Auflösung

Das Modell sollte folgende Modi abbilden:

- Pkw-Selbstfahrer, Pkw-Mitfahrer
- ÖV differenziert nach Fahrkartenart (Einzelfahrkarte / Zeitkarte) oder Beförderungsklasse (1. / 2. Klasse)
- Rad
- Fuß

### Verwendetes Moduswahlmodell

Die Nutzenfunktion sollte bei der Moduswahl folgende Attribute enthalten: Fahrtzeit im Verkehrsmittel, Zu- und Abgangszeit, Umsteigewartezeit, Reisekosten (Fahrpreise, Kraftstoffkosten, Straßen- und Parkplatznutzungsgebühren), Startwartezeit oder Bedienungshäufigkeit oder Anpassungszeit, Umsteigehäufigkeit. Die Verfügbarkeit von ÖV-Zeitkarten und Pkw-Verfügbarkeit sollte entweder als Teil der Nutzenfunktion oder über zusätzliche Personengruppen berücksichtigt werden.

Weitere Informationen zur Moduswahl finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.1.4.

## 6.6 Umlegung IV

Die Routenwahl im Kfz-Verkehr sollte mit einem Gleichgewichtsmodell ermittelt werden. Straßenbenutzungsgebühren sollten in die Widerstandsfunktion aufgenommen werden. Es ist ein Umlegungsverfahren zu wählen, dass die Verkehrsstärken auf Abbiegern angemessen abbilden kann.

Die Widerstandsfunktion soll folgende Komponenten umfassen:

- Zeit und Länge
- Kosten
- Widerstände für Lkw-Durchfahrtsverbot

Weitere Informationen zur IV-Umlegung finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.1.8.1.

## 6.7 Umlegung ÖV

Es ist eine fahrplanbasierte Umlegung erforderlich. Die Widerstandsfunktion sollte Fahrpreise berücksichtigen. Der Einsatz fahrplanbasierter Modelle führt in der Prognose zu Schwierigkeiten, wenn für den Prognosezeitpunkt keine koordinierten Fahrpläne, sondern nur Takte vorliegen. Um in diesem Fall trotzdem fahrplanbasierte Modelle nutzen zu können, kann der Parameter für die Bewertung der Umsteigewartezeit auf 0 gesetzt und der Parameter für die Bewertung der Umsteigehäufigkeit erhöht werden.

Weitere Informationen zur ÖV-Umlegung finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.1.8.2.

## 6.8 Abfahrtszeitwahl

Die Erzeugung von tageszeitspezifischen Matrizen soll über Ganglinien erfolgen. Die Ganglinien müssen dazu für jeden Aktivitätenübergang (z.B. Wohnen-Arbeiten, Arbeiten-Wohnen) vorgegeben werden.

Weitere Informationen zur Abfahrtszeitwahl finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.1.7.

## 7 Externer Verkehr und Wirtschaftsverkehr

### 7.1 Externer Verkehr

Die Matrix im Außenraum ist aus einem übergeordneten Modell oder einer Erhebung zu gewinnen. Um die Qualität der externen Matrix prüfen zu können, sind für den Rand des Untersuchungsraumes zum Außenraum Zählwerte erforderlich, um einen Vergleich mit den erzeugten Belastungen durchzuführen.

### 7.2 Wirtschaftsverkehr

Der Güterverkehr im Planungsraum ist von großer Bedeutung und sollte mit einem geeigneten Wirtschaftsverkehrsmodell abgebildet werden.

Im Wirtschaftsverkehr sollte der Straßengüterverkehr (Lkw) und der Personenwirtschaftsverkehr abgebildet werden.

Das Wirtschaftsverkehrsmodell sollte folgende Anforderungen erfüllen:

- Der Straßengüterverkehr sollte mit einem Wirtschaftsverkehrsmodell ermittelt werden, dass differenzierte Wirtschaftsverkehrssegmente (z.B. Branche Forstwirtschaft oder Gutart Post) nutzt und Fahrzeugklassen für die Umlegung (Lkw nach Gewichtsklasse ( $< 7,5$  t,  $< 12$  t,  $\geq 12$  t), Lieferwagen) unterscheidet
- Der Personenwirtschaftsverkehr sollte als ein eigener Wegezweck (z.B. Dienst) abgebildet werden.
- Wichtige Quellen und Ziele des Wirtschaftsverkehrs (z.B. KV-Terminals, Güterverkehrszentren, Flughäfen) sind als einzelne Verkehrszellen zu modellieren.

Weitere Informationen zum Wirtschaftsverkehr finden sich im Forschungsbericht in Kapitel 5.5.2.

## 8 Prognose

Der Prognosehorizont des Modells soll folgenden Zeitraum umfassen:

- mehr als 15 Jahre

Die Verkehrsprognose baut auf dem validierten Verkehrsnachfragemodell auf, das den Analysefall beschreibt und umfasst folgenden Schritte:

1. Fortschreibung der für die Entwicklung des Verkehrs relevanten demographischen Daten, Siedlungsstrukturdaten, Motorisierungsgrade und Nutzungskosten für den Prognosezeitpunkt,
2. Erfassung der für die Entwicklung des Verkehrs bedeutsamen und bis zum Prognosezeitpunkt mit hoher Wahrscheinlichkeit realisierten Maßnahmen im Verkehrsangebot,
3. Erfassung externer Nachfragedaten für den Prognosezeitpunkt, die mit dem Verkehrsnachfragemodell nicht erzeugt werden können,
4. Durchführung der Prognoserechnung und Überprüfung der Plausibilität des Prognoseergebnisses und
5. Ermittlung der gewünschten Kenngrößen für den Prognosezustand (siehe Tabelle 1).

## 9 Validierung des Modells

### 9.1 Überprüfung der Modellgenauigkeit

Die Qualität des Verkehrsnachfragemodells soll durch einen Vergleich von berechneten Modellwerten  $m$  ( $m$  = Modell) und Messwerten  $c$  ( $c$  = Count) nachgewiesen werden. Dabei sollen Einzelwerte und Verteilungen verglichen werden.

### 9.2 Einzelwerte

Hier wird ein einzelner Modellwert mit einem Messwert verglichen. Für jedes Wertepaar wird eine Aussage über die Güte der Übereinstimmung gemacht. Beispiele für Einzelwerte sind Verkehrsstärken an einer Zählstelle, mittlere Reiseweiten oder Fahrzeiten eines Streckenzugs.

Für den Vergleich zweier Einzelwerte soll der  $SQV$ -Wert (Scalable Quality Value) genutzt werden, der wie folgt definiert ist:

$$g_{SQV} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(m-c)^2}{f \cdot c}}}$$

mit

$g_{SQV}$	Gütemaß $SQV$
$m$	Wert des Modells
$c$	Wert der Erhebung
$f$	Skalierungsfaktor

Der Skalierungsfaktor ermöglicht es, das Gütemaß für Messwerte unterschiedlicher Größenordnungen (Verkehrsstärken Tag, Verkehrsstärken Stunde, mittlere Reisezeit, Zahl der Wege) zu nutzen.

Bild 2 zeigt die zulässigen relativen Abweichungen für verschiedene Messwerte  $c$  und Skalierungsfaktoren  $f$ . Für  $f = 1.000$  entspricht ein  $SQV$ -Wert von 0,85 ungefähr einem GEH von 6. In

Tabelle 2 ist für jede zu validierende Größe der Zielwert des  $SQV$  und der Skalierungsfaktor  $f$  angegeben.

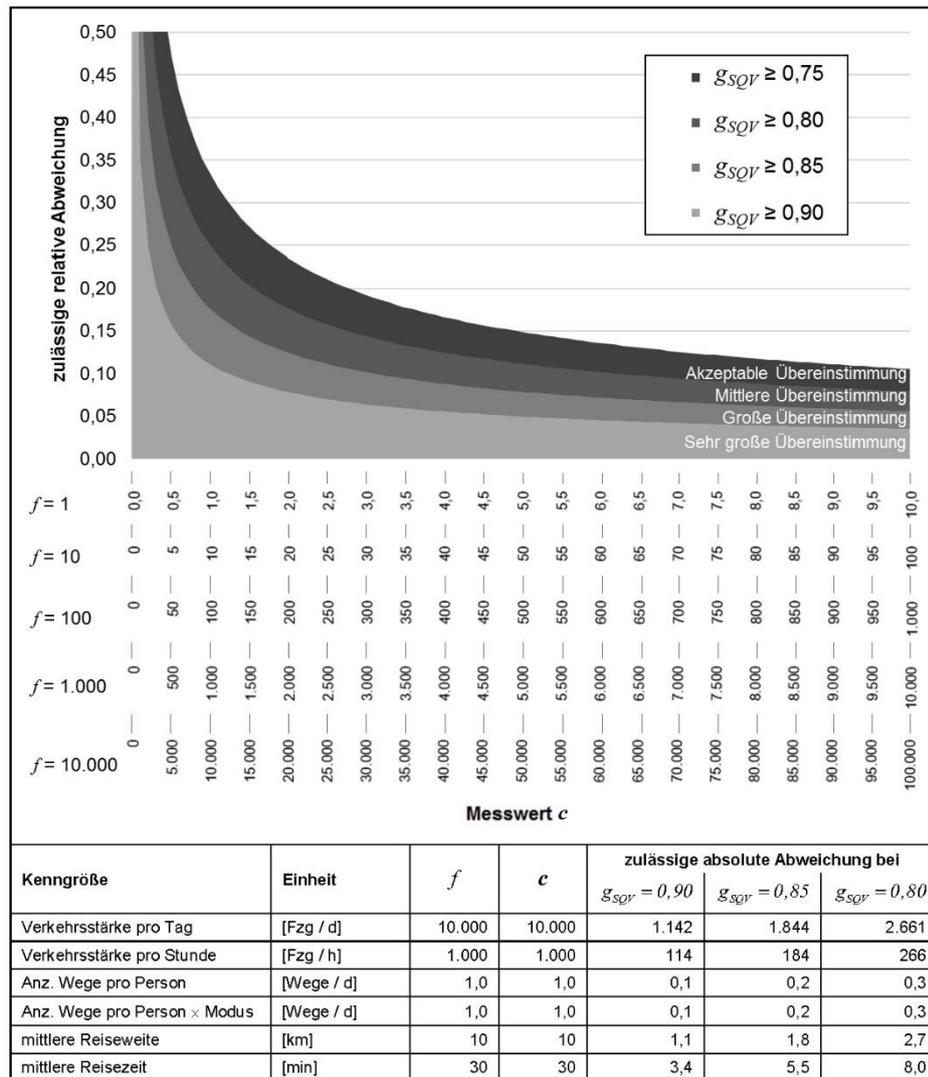


Bild 2: Beurteilung verschiedener Kenngrößen mit dem  $SQV$ -Wert und Beispiele für zulässige Abweichungen für einen Messwert  $c$ .

### 9.3 Verteilungen

Hier werden Häufigkeitsverteilungen von modellierten und gemessenen Werten verglichen. Beispiele für Häufigkeitsverteilungen sind Reiseweiten- oder Reisezeitverteilungen.

Für den Vergleich zweier Verteilungen soll das Coincidence Ratio ( $CR$ ) genutzt werden. Das  $CR$  untersucht, wie gut sich zwei Verteilungen überdecken. Eingangsgröße für die Berechnung sind die jeweiligen relativen Häufigkeiten der Verkehrsnachfrage in einer Entfernungs- oder Zeitklasse. Der

errechnete  $CR$  hat einen Wertebereich von 0 bis 1, wobei  $CR=1,0$  eine vollkommene Übereinstimmung und  $CR=0$  keinerlei Übereinstimmung anzeigt. Ab einem Wert von  $CR=0,7$  wird von einer guten Übereinstimmung ausgegangen.

$$g_{CR} = \frac{\sum_{k \in K} \min \{ p_k^m, p_k^c \}}{\sum_{k \in K} \max \{ p_k^m, p_k^c \}}$$

$$p_k^m = \frac{m_k}{\sum_{k \in K} m_k}$$

$$p_k^c = \frac{c_k}{\sum_{k \in K} c_k}$$

mit

$g_{CR}$  Gütemaß Coincidence Ratio

$K$  Zahl der Klassen in der Häufigkeitsverteilung

$m_k$  Summe der Nachfrage aus dem Modell in der k. Klasse

$c_k$  Summe der Nachfrage aus der Erhebung in der k. Klasse

$p_k^m$  Anteil der Nachfrage aus dem Modell in der k. Klasse

$p_k^c$  Anteil der Nachfrage aus der Erhebung in der k. Klasse

Für die Validierung der Reiseweitenverteilung soll die Luftlinienweite herangezogen werden. Die Luftlinienweite im Modell ergibt sich aus den Koordinaten der Zellenschwerpunkte. Die Luftlinienweite in der Haushaltsbefragung<sup>2</sup> ergibt sich entweder aus den Koordinaten der Aktivitätenorte in der Haushaltsbefragung oder aus einer Zuordnung der Aktivitätenorte zu einer Verkehrszelle. Für die Berechnung des  $CR$  sollen 10 äquidistante Klassen gebildet werden. Für die Klassenbildung sollen die nachfragegewichteten Wege der Haushaltsbefragung genutzt werden, die Quelle und Ziel im Untersuchungsraum haben. Mit dieser Klassierung wird für jeden Modus der Anteil der Nachfrage ermittelt, der in jede Klasse entfällt. Für jeden Modus wird das  $CR$  berechnet.

#### 9.4 Zielwerte für die Validierung

Tabelle 2 zeigt die Kenngrößen und die zulässigen Abweichungen, die eingehalten werden sollen. Die Nichteinhaltung muss begründet werden und der Auftraggeber muss der Abweichung zustimmen.

<sup>2</sup> Falls für den Untersuchungsraum keine Haushaltsbefragung vorliegt, können Daten aus den Projekten Mobilität in Deutschland (MiD) oder Mobilität in Städten (SrV) genutzt werden.

## Verkehrsnachfragemodell „BMVI Testfall“

16

	Kenngröße	Differenzierung		Kontroll- daten	statistisches Gütemaß
		inhaltlich	räumlich		
Verkehrsaufkommen	mittlere Anzahl Wege pro Person	<ul style="list-style-type: none"> <li>alle Einwohner</li> <li>pro Modus</li> <li>pro NGruppe</li> <li>pro Modus x NGruppe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>gesamter UR</li> <li>Teiräume</li> </ul>	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gütemaß <math>SQV &gt; 0,9</math> für <math>f = 1</math></li> </ul>
Verkehrsleistung	Reiseweitenverteilung [km] pro Weg	<ul style="list-style-type: none"> <li>alle Einwohner</li> <li>pro Modus</li> <li>pro NGruppe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>gesamter UR</li> </ul>	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> <li>mittlere Reiseweite pro Weg: Gütemaß <math>SQV &gt; 0,9</math> für <math>f = 10</math></li> <li>Reiseweitenverteilung: Coincidence Ratio <math>&gt; 0,7</math></li> </ul>
	mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person	<ul style="list-style-type: none"> <li>alle Einwohner</li> <li>pro Modus</li> <li>pro NGruppe</li> <li>Modus ÖV</li> <li>ÖV-Betriebszweige</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>gesamter UR</li> <li>Teiräume</li> </ul>	HH-Bef ÖV-Erhebung	<ul style="list-style-type: none"> <li>mittlere Reiseweite pro Tag: Gütemaß <math>SQV &gt; 0,9</math> für <math>f = 10</math></li> </ul>
Verkehrszeitaufwand	Reisezeitverteilung [min] pro Weg	<ul style="list-style-type: none"> <li>alle Einwohner</li> <li>pro Modus</li> <li>pro NGruppe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>gesamter UR</li> </ul>	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> <li>mittlere Reisezeit pro Weg: Gütemaß <math>SQV &gt; 0,9</math> für <math>f = 30</math></li> <li>Reisezeitverteilung: Coincidence Ratio <math>&gt; 0,7</math></li> </ul>
	mittlerer Verkehrszeitaufwand [min] pro Person	<ul style="list-style-type: none"> <li>alle Einwohner</li> <li>pro Modus</li> <li>pro NGruppe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>gesamter UR</li> </ul>	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> <li>mittlere Reisezeit pro Tag: Gütemaß <math>SQV &gt; 0,9</math> für <math>f = 100</math></li> </ul>
Verkehrsstärke	tägliche und stündliche Verkehrsstärke (ohne Matrixkorrektur)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pkw</li> <li>Lkw</li> <li>Rad</li> <li>Bus</li> <li>Bahn</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Strecke</li> <li>Abbieger</li> <li>Strecke einer Linienroute</li> <li>Haltestellen</li> <li>Screenline</li> </ul>	Zählung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tageswerte: Gütemaß <math>SQV &gt; 0,8</math> für <math>f = 10.000</math></li> <li>Stundenwerte: Gütemaß <math>SQV &gt; 0,8</math> für <math>f = 1.000</math></li> </ul>
Fahrtzeiten	Fahrtzeiten zwischen zwei Punkten im Netz	<ul style="list-style-type: none"> <li>unbelastetes Netz</li> <li>belastetes Netz für relevante Tageszeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Streckenzug</li> <li>Relationen</li> </ul>	Fahrtzeitmessung <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>absolute Abweichungen nach Bild 3</li> </ul>
HH-Bef:		Haushaltsbefragung mit Wegetagebüchern. Die Datensätze sollten gewichtet vorliegen. Es werden nur solche Wege als Kontrolldaten berücksichtigt, die im Untersuchungsraum beginnen und enden.			
ÖV-Erhebung:		Quelle-Ziel-Befragungen im ÖV-Fahrzeug, die mit Einsteigerzählungen hochgerechnet werden oder aus Fahrkartendaten abgeleitete Verkehrsleistung.			
UR:		Untersuchungsraum, in dem die Verkehrsnachfrage modelliert wird.			
NGruppe:		Nachfragegruppe (Personengruppe und / oder Wegezweck)			
Alle Kenngrößen beziehen sich auf einen Tag.					

Tabelle 2: Zielwerte für die Validierung.

<sup>3</sup> Als Konkretisierung könnte hier folgendes stehen: Fahrtzeit um 20:00 Uhr und 7:00 für 30 bis 50 ausgewählte Streckenzüge. Datenquelle ein kommerzieller Anbieter) Google, TomTom, Here, Inrix)

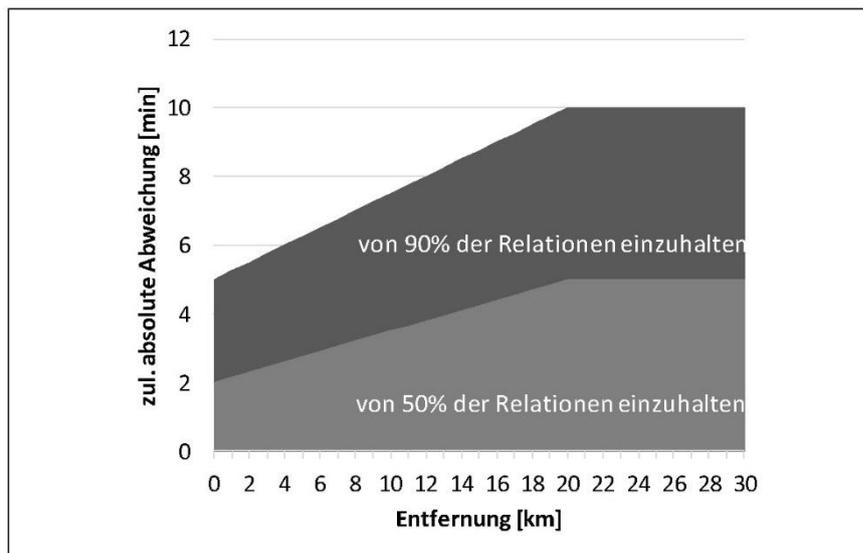


Bild 3: Bewertung der Abweichung für Einzelwerte von Fahrtzeiten.

### 9.5 Überprüfung des Modellverhaltens

Mit Realitätstests wird geprüft, ob die Wirkungen eines Modells bei Änderungen der Variablen in der erwarteten Größenordnung liegen. Dazu werden die Variablen des Verkehrsangebots oder die Siedlungsstrukturdaten in kontrollierter Weise verändert. Dann werden die Nachfrageänderungen ermittelt und beurteilt.

Folgende Realitätstests sind für das kalibrierte Analysemodell vorgesehen:

1. Pauschale Erhöhung der Einwohnerzahl im Untersuchungsraum um 10%.
2. Pauschale Halbierung der Bedienungshäufigkeit auf allen Linien im Untersuchungsraum durch Löschen jeder zweiten Fahrplanfahrt.
3. Variation der MIV-Nutzungsgebühren: +50%
4. Variation der ÖV-Nutzungsgebühren: -50%
5. Variation der Streckenkapazität für ausgewählte Netzelemente: z.B. eine Autobahnanschlussstelle oder eine Brücke sperren.

Für jeden Realitätstest sind die Kenngrößen aus Tabelle 1 auszuweisen und die relativen und absoluten Änderungen zu ermitteln. Änderungen bei den Verkehrsstärken sollen in Karten mit Belastungsdifferenzen dargestellt werden.

Tabelle 3 zeigt Wirkungen, die vom Auftraggeber für die Realitätstests erwartet werden. Eventuelle Abweichungen müssen begründet werden.

## Verkehrsnachfragemodell „BMVI Testfall“

18

Nr	Test	Erwartung
1	Erhöhung der um 10%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zunahme der Verkehrsleistung</li> <li>• Rückgang der mittleren Reiseweite</li> <li>• Rückgang des Pkw-Anteils</li> </ul>
2	Reduzierung der Bedienungshäufigkeit – jede zweite Fahrplanfahrt wird gelöscht	<ul style="list-style-type: none"> <li>• deutlicher Rückgang im ÖV</li> </ul>
4	Variation der MIV-Nutzungsgebühren: +50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nachfrage im Pkw sinkt</li> <li>• Rückgang der mittleren Reiseweite</li> </ul>
4	Variation der ÖV-Nutzungsgebühren: -50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nachfrage im ÖV steigt</li> <li>• Zunahme der mittleren Reiseweite</li> </ul>
5	Variation der Streckenkapazität	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Räumliche Verlagerung der Kfz-Nachfrage</li> <li>• Große Verkehrsstärkeänderungen im Nahbereich der Maßnahme, geringe Änderungen im Fernbereich</li> </ul>

Tabelle 3: Erwartete Wirkungen bei den Realitätstests.

## 10 Verfügbare Daten

Die Leistungsbeschreibung ist um die Checkliste „Eingangsdaten“ des Forschungsberichtes FE 70.919/2015 zu ergänzen. Weitere Hinweise finden Sie in Kapitel 6 des Forschungsberichts.

## 11 Modellspezifikation und Dokumentation

### 11.1 Modellspezifikation

Nach Auftragsvergabe erarbeitet der Auftragnehmer aufbauend auf dieser Leistungsbeschreibung und dem Angebot eine detaillierte Modellspezifikation und stimmt diese mit dem Auftraggeber ab. In der Modellspezifikation beschreibt der Auftragnehmer auch, welche Daten und Zuarbeiten durch den Auftraggeber zur Erfüllung des Auftrags benötigt werden. Erst nach der gemeinsamen und einvernehmlichen Abstimmung der Modellspezifikation wird mit der eigentlichen Bearbeitung des Modells begonnen.

Die Modellspezifikation wird vom Auftragnehmer kontinuierlich fortgeschrieben und dient als Grundlage für das Modellhandbuch.

### 11.2 Modelldokumentation

Die Modelldokumentation soll einen Modellergebnisbericht, ein Modellhandbuch und einen Modellvalidierungsbericht umfassen.

- Modellergebnisbericht: Die Modellannahmen, der Modellaufbau und die wesentlichen Modellergebnisse müssen in einem Bericht dokumentiert werden.
- Modellhandbuch: Die technische Umsetzung des Modells, die verwendeten Berechnungsalgorithmen und die genutzte Software müssen so beschrieben werden, dass Dritte die Modellrechnungen nachvollziehen können. Dazu gehört die Dokumentation der wesentlichen Modellparameter (u.a. Produktionsraten, Parameter der Nutzenfunktion, Kapazitäten). Dritte müssen die Modellrechnungen wiederholen und analysieren können, wenn das Modell und die Modellierungssoftware zur Verfügung gestellt werden.

- Modellvalidierungsbericht: Die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Modellvalidierung müssen so beschrieben werden, dass die Validierung von Dritten nachvollzogen werden kann. Der Modellvalidierungsbericht soll Aussagen zur Modellgenauigkeit enthalten.

### 11.3 Übergabe des Modells

Alle Bestandteile des Modells sind dem Auftraggeber in einer geeigneten Form zu übergeben, so dass das Modell auf Rechnern des Auftraggebers lauffähig ist. Der Auftraggeber soll in der Lage sein, Modellläufe selbstständig durchzuführen.

## 12 Projektorganisation

### 12.1 Arbeitsschritte und Zeitplan

Der Auftraggeber strebt eine Projektdauer von [x<sup>4</sup>] Jahren an. Dem Auftraggeber ist die Einhaltung der Zeitpläne wichtig. Deshalb soll der Anbieter basierend auf vorgegebenen Meilensteinen einen Zeitplan erstellen, der folgende Informationen enthält:

- Wie viele Wochen nach Vergabe kann die Projektbearbeitung beginnen? Ab diesem Zeitpunkt sollen die Projektbearbeiter im erforderlichen Umfang für das Projekt zur Verfügung stehen.
- Wie groß ist der Zeitbedarf für die einzelnen Arbeitsschritte und für das gesamte Projekt?
- Für die Zeitplanung werden mehrere Arbeitsschritte zu Meilensteinen zusammengefasst. Jeder Meilenstein wird schriftlich abgenommen. Nachstehende Tabelle zeigt die Meilensteine des Projekts<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> Die Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells wird ohne Haushaltsbefragungen je nach Modellumfang 1,5 bis 3 Jahre in Anspruch nehmen

<sup>5</sup> An dieser Stelle können Regeln für den Zahlungsplan ergänzt werden.

## Verkehrsnachfragemodell „BMVI Testfall“

20

Meilenstein	Arbeitsschritt
Meilenstein 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fertigstellung Spezifikation</li> </ul>
Meilenstein 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fertigstellung Netzmodell inkl. Dokumentation</li> </ul>
Meilenstein 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fertigstellung Strukturdaten für Analyse und Prognose inkl. Dokumentation</li> <li>Fertigstellung Aufbereitung der Haushaltsbefragung (z.B. MiD 2017)</li> <li>Fertigstellung Aufbereitung Zähl Daten</li> </ul>
Meilenstein 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fertigstellung Modell privater Personenverkehr inkl. Dokumentation</li> <li>Fertigstellung Modell Wirtschaftsverkehr inkl. Dokumentation</li> </ul>
Meilenstein 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fertigstellung Umlegung IV und ÖV</li> <li>Fertigstellung Modellkalibrierung</li> </ul>
Meilenstein 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fertigstellung Validierung</li> <li>Fertigstellung Modelldokumentation</li> </ul>
Meilenstein 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modellprognose inkl. Dokumentation</li> </ul>
...	<ul style="list-style-type: none"> <li>weitere Aufgaben, z.B. Modellschulung</li> </ul>

Tabelle 4: Meilensteine und Arbeitsschritte.

Die Meilensteine müssen nicht sequentiell entsprechend der Nummerierung bearbeitet werden. Im Angebot kann bei den Meilensteinen auf mögliche Risiken hingewiesen werden.

## 12.2 Meilensteinberichte und Projektgespräche

Zu jedem Meilenstein ist ein Kurzbericht mit den durchgeführten Arbeiten und einem aktualisierten Zeitplan abzugeben. Außerdem sind der aktuelle Modellstand und der aktuelle Stand des Modellhandbuchs zu übergeben.

Zur Projektbegleitung sind Projektgespräche am Sitz des Auftraggebers und regelmäßige Telefonkonferenzen einzuplanen:

- Ein Auftaktgespräch
- Ein Projektgespräch nach Abschluss jedes Meilensteins
- Eine Abschlusspräsentation mit Einführung in das Modell
- Telefonkonferenzen und Projektfortschrittsbericht: etwa alle 4 Wochen