

# Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 368

**bast**

# Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen

von

Markus Friedrich  
Jürgen Bawidamann

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

Lars Peter

PTV Planung Transport Verkehr AG  
Karlsruhe

Volker Waßmuth

PTV Transport Consult GmbH  
Karlsruhe

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 368

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 01.0197**  
Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen

**Fachbetreuung**  
Kerstin Lemke  
Andreas Coumanns

**Referat**  
Straßenentwurf, Verkehrsablauf, Verkehrsregelung

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-726-6

Bergisch Gladbach, April 2023

## Kurzfassung – Abstract

### Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen

Der Zeitaufwand für eine Ortsveränderung ist die zentrale Kenngröße zur Beschreibung der Angebotsqualität in einem Verkehrsnetz. Damit Fahrzeitdaten für die Planung und die Bewertung genutzt werden können, müssen die Fahrzeitdaten aus unterschiedlichen Quellen vergleichbar sein. Falls das nicht gewährleistet ist, könnten in der Realität identische oder vergleichbare Verkehrszustände in Abhängigkeit der Datenquelle in der Planung unterschiedlich bewertet werden.

Aus dieser Forderung ergeben sich die Ziele und die Vorgehensweise des Forschungsvorhabens:

- (1) Es wurden verbindungsbezogene Reisezeiten im Straßenverkehr mit verschiedenen Methoden und Datenquellen (Google, HERE, INRIX, TomTom, Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate) ermittelt und verglichen. Dazu wurden Fahrzeiten für 16 ausgewählte Relationen untersucht.
- (2) Es wurde eine allgemein zugängliche Datenbasis für verbindungsbezogene Reisezeiten zwischen zentralen Orten (Metropolregionen, Oberzentren, Mittelzentren) zur Beurteilung der Zeitdaten anderer Datenquellen erstellt. Die Datenbasis umfasst 21.500 ausgewählte Relationen. Für jede Relation werden Fahrzeitdaten aus drei Datenquellen (Verkehrsnachfragemodell, Google, TomTom) für mehrere Tageszeiten und Perzentile bereitgestellt.
- (3) Aufbauend auf dem Vergleich der Methoden und Datenquellen wurde ein Konzept entwickelt, mit dem die Zeitdaten einer vom Anwender gewählten Datenquelle anhand der erstellten Datenbasis beurteilt und ggf. korrigiert werden können. Um die Vergleichbarkeit einer beliebigen Analysedatenquelle und einer Referenzdatenquelle zu überprüfen, wird ein zweistufiges Vorgehen vorgeschlagen, das aus einer Validierungsstufe und einer Anpassungsstufe besteht.
- (4) Es werden Referenzkurven zur Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität für die RIN (Richtlinien für integrierte Netzgestal-

tung, RIN 2008) vorgeschlagen. Es wurden drei Bewertungskurven geschätzt:

- Luftliniengeschwindigkeit in der Neben- oder Schwachverkehrszeit.
- Luftliniengeschwindigkeit in der Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen.
- Luftliniengeschwindigkeit in der Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen.

Die Parameter der Referenzkurven wurden mit zwei Ansätzen bestimmt. Im ersten Ansatz wurden die empirischen Reisezeiten der Datenbasis für die Schätzung der Parameter genutzt. Im zweiten Ansatz wurden für die Parameterschätzung Reisezeiten aus typischen Eigenschaften des Verkehrswegenetzes abgeleitet. Die Ergebnisse sollen als Basis für weitere Diskussionen zur Fortschreibung der RIN 2008 in den zuständigen Gremien dienen.

### Methods for assessing service quality in road networks

The time required for a journey is the core indicator for describing the quality of services in a transport network. To use travel time data for planning and evaluation, travel time data from different sources must be comparable. If this is not guaranteed, identical or comparable traffic states might in reality be evaluated differently in planning depending on the data source.

The objectives and the approach of the research project result from this requirement:

- (1) Origin-destination travel times in road traffic were determined and compared using different methods and data sources (Google, HERE, INRIX, TomTom, travel demand model PTV-Validate). For this purpose, travel times of 16 selected connections were investigated.
- (2) A generally accessible database for origin-destination travel times between central locations (metropolitan regions, regional centres, medium-sized centres) was created to assess time data from other sources. The database comprises 21,500 selected connec-

tions. For each connection, travel time data from three data sources (travel demand model, Google, TomTom) are provided for several times of day and percentiles.

- (3) Based on the comparison of the methods and data sources, a concept was developed with which the time data of a particular data source selected by a user can be assessed using the developed database and if necessary corrected. In order to check the comparability of any analysis data source and a reference data source, a two-stage procedure is proposed consisting of a validation stage and an adaptation stage.
- (4) Reference curves for assessing the quality of supply for the RIN (Guidelines for Integrated Network Design, RIN 2008) are suggested. Three evaluation curves were estimated:
  - Direct speed in the off-peak period.
  - Direct speed in the peak hour without random disturbances.
  - Direct speed in the peak hour with random disturbances.

The parameters of the reference curves were determined with two approaches. In the first approach, the empirical travel times of the database were used to estimate the parameters. In the second approach, travel times were derived from typical characteristics of the road network for the parameter estimation. The results should serve as a basis for further discussions on the revision of the RIN 2008 in the responsible committees.

## Summary

### Methods for assessing service quality in road networks

#### Task definition

The time required for a journey is the core indicator for describing the quality of services in a transport network. To use travel time data for planning and evaluation, travel time data from different sources must be comparable. If this is not guaranteed, identical or comparable traffic states might in reality be evaluated differently in planning depending on the data source.

The objectives and the approach of the research project result from this requirement:

- Origin-destination travel times in road traffic are to be determined and compared using various methods (model- and empirical-based) and data sources.
- A generally accessible database for origin-destination travel times between central locations (cities of international, national and regional importance) is to be created to assess travel time data from other sources.
- Based on the comparison of methods and data sources, a concept is developed with which the travel time data of a data source can be assessed and if necessary corrected.
- Using the developed database reference curves for assessing the quality of supply for the RIN (Guidelines for Integrated Network Design, RIN 2008) are to be prepared.

#### State of the art for recording and evaluating service quality of connections

Selected indicators were defined to describe the service quality. Then methods for the evaluation of these indicators were presented. Next methods were described for determining travel times and journey times. Sources of Floating Car Data (FCD) were described, which are required to determine the travel times of connections (origin-destination-pairs) required for the project.

## Analysis of selected connections

In order to investigate the validity of different data sources and data providers, travel times for 16 selected connections were determined using three different methods and five data sources:

1. Travel times from the travel demand model PTV-Validate.
2. Link-based travel times from FCD of the providers HERE, INRIX and TomTom.
3. Origin-destination-based travel times from FCD of the provider Google.

The providers delivered travel time data with different characteristics. While TomTom and HERE give the average value and percentiles, INRIX provides one estimated value and Google three values (Best-Guess, Optimistic, Pessimistic). The result of the comparison of the data for the sample of 16 connections shows the following:

- Google Best Guess travel times and INRIX travel times are closer to the 75% percentile of HERE and TomTom than the median. This suggests that a higher percentile rather than the median is used in the internal data processing of Google and INRIX:

$$t_{HERE}^{P50} \approx t_{TomTom}^{P50} < t_{Google}^{Best} \approx t_{INRIX} < t_{HERE}^{P75} < t_{TomTom}^{P75}$$

- While the median has similar values for TomTom and HERE, the mean and percentiles > 50% give longer travel times for TomTom than for HERE:

$$t_{HERE}^{P50} \approx t_{TomTom}^{P50} \text{ and } t_{HERE}^{Mean} < t_{TomTom}^{Mean} \text{ and } t_{HERE}^{P75} < t_{TomTom}^{P75}$$

- The Google Optimistic travel times correspond approximately to the median of TomTom and HERE:

$$t_{HERE}^{P50} \approx t_{TomTom}^{P50} \approx t_{Google}^{Opt}$$

- The travel demand model provides travel times in the loaded network that best match the 90% percentiles of the FCD during peak hour. In the unloaded network, the travel times best match the median of the FCD in the off-peak time.
- If travel time data of one particular data source is used to determine delay time (target travel time and actual travel time from one data source), the resulting delays can differ considerably between the data sources.

## Structure of the database

For the database 21,582 connections were selected. They comprise all connections of the connection function levels 0 to II (approx. 17,200 connections) and additionally about 1,500 connections in short distance ranges up to 15 km as well as 2,900 connections in long distance ranges > 125 km. For the selected connections, travel time data were determined using three data sources (travel demand model PTV-Validate, Google, TomTom). The following travel time characteristics are provided:

- Data source travel demand model (PTV-Validate):
  - Travel times unloaded and loaded network
  - Mode LDV
- Data source link-based FCD (TomTom):
  - Travel times for 4 times of day (07:00, 10:00, 17:00, 20:00)
  - Percentile 50%, 75% and 90%, mean
  - Mode LDV and HDV
- Data source origin-destination-based FCD (Google):
  - Travel times for 9 times of day (04:00, 06:00, 07:00, 08:00, 10:00, 14:00, 17:00, 18:00, 20:00)
  - States Best-Guess, Pessimistic and Optimistic
  - Mode LDV

An analysis of the travel times shows a relatively small influence of the time of day on the travel time or the travel speed for both FCD sources (TomTom and Google). For understanding this unexpected result, the travel times of the data source TomTom were analysed on link level. The results of the analysis show that, due to the selection of connections, links are underrepresented in conurbations. This leads to the result that the delay times per kilometre for an average car trip are higher than for an average connection from the set of selected connections.

## Concept for comparing data sources

A method is suggested which enables a RIN user to use journey or travel time data from any data source for the evaluation of the quality of the service. The starting point is a RIN application in which journey or travel time data from any data source can be used to determine the quality of the service. The RIN users should be offered a practicable method that enables them to assess the travel time data from their data source. The RIN users are therefore provided with the travel time data determined in this project as reference travel time data. This reference data source contains for each of the 21,582 relations the direct distance and various travel times.

To check the comparability of any analysis data source  $Q_A$  and a reference data source  $Q_R$ , a two-step procedure is proposed:

1. Validation of the analysis data source: The similarity of the travel time data is compared. The SAQ values are used for this comparison. For validation of the analysis data source, the five LOS curves of the RIN are extended by two further LOS curves A+/A and F/F+. These seven LOS curves are then subdivided into four equally spaced subclasses for each LOS. This results in 25 LOS curves ( $7 + 6 \times 3 = 25$ ). These 25 LOS curves define 24 LOS ranges, each of which is bounded by two LOS curves. The finer subdivision enables more precise statements about the deviations in LOS values between the analysis and reference data sources. In order to quantify the agreement, it is suggested to determine the mean square deviation of the LOS values when using the 24-level scale. A sufficient match can now be defined normatively. If one assumes that sufficient match is given when an assessment according to RIN deviates on average by less than half a LOS value, then a maximum value for the distance measure should be set to 1.5 or 2.0.
2. Adjustment of the analysis travel time data: If the validation of the analysis data source shows an insufficient matching of the data sources, the analysis travel time data for the RIN assessment may be adjusted. A function with three adaptation parameters is proposed for this purpose. The adaptation parameters are to be determined in such a way that the distance measure becomes minimal.

## Determining reference curves for assessing the quality of service

Reference curves for the sectoral assessment of LDV traffic and HDV traffic are suggested. Basis for the determination of the reference curves is the established database. Three evaluation curves were estimated:

- Direct speed in off-peak periods: This assessment is based on travel times without major time losses due to capacity bottlenecks. „The use of travel times in off-peak hours is indicated when checking whether a suitable connection is basically available in the network to reach a central location“ (RIN, page 20).

The median of the travel times during off-peak hours is suggested as the representative travel time for off-peak hours.

- Direct speed during peak hours without random disturbances: This assessment is based on the travel times during the peak period, when time losses due to capacity bottlenecks occur in parts of the network. In order to avoid a distinction between morning and evening peak hours, the maximum from both periods is used for the estimation of the curves. „The use of travel times during peak periods is indicated when checking whether such a connection is sufficiently designed for travel demand“ (RIN, page 20).

The median of the peak hour travel times (maximum of morning and afternoon peak) is selected as the representative travel time for the peak hour without random disturbances.

- Direct speed during peak hours with random disturbances: This assessment is based on the peak period travel times when random disturbances occur. This allows statements on reliability.

The 75%-percentile of the peak hour travel time (maximum of morning and afternoon peak) is suggested as representative travel time for the peak hour with random disturbances.

The parameters of the reference curves were determined with two approaches. In the first approach, the empirical travel times of the database were used to estimate the parameters. In the second approach, travel times for the parameter estimation

were derived from typical characteristics of the transport network. Both curves differ only slightly.

The suggested reference curves lead to more demanding evaluations than the previous RIN reference curves. The difference is about one service level. The difference decreases with increasing direct distance.

## Implications for the practice

The spatial aggregation of travel time data from FCD from link sections to longer distances is possible for mean travel times by simple summation. However, summing up percentiles of travel time over several link sections does not provide correct results, because in congested traffic conditions the high percentiles on a section of a route are usually derived from other vehicles and therefore summing up percentiles overestimates the travel time. Nevertheless, the percentiles P75 and P90 were calculated for the database as a basis for the evaluation of the peak hour with random disturbances.

FCD are a valuable source of data for determining travel times. However, the preparation processes of commercial FCD providers are not comprehensible to third parties. The comparisons carried out show that the travel times of the providers differ significantly in some cases and especially in the higher percentiles.

The results of the study are to serve as a basis for further discussions on updating the RIN 2008 in the responsible committees.



## Inhalt

<b>Glossar</b> .....	11	<b>3 Analyse ausgewählter Relationen</b> ...	44
<b>1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise</b> .....	15	3.1 Auswahl der Relationen .....	44
1.1 Aufgabenstellung .....	15	3.2 Ermittlung der Fahrtzeiten .....	44
1.2 Vorgehensweise .....	15	3.3 Validierung der Fahrtzeitdaten .....	46
<b>2 Stand der Technik zur Erfassung und Bewertung der Verbindungsqualität</b> .....	17	3.4 Vergleich der Datenquellen .....	51
2.1 Kenngrößen zur Beschreibung der Verbindungsqualität .....	17	3.4.1 Fahrtzeiten im Tagesverlauf .....	51
2.1.1 Kenngrößen des Zeitaufwandes .....	18	3.4.2 Mittlere Fahrtzeiten und Verlustzeiten .....	53
2.1.2 Kenngrößen der Zuverlässigkeit .....	22	3.4.3 Paarweiser Vergleich der Abweichungen .....	55
2.2 Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität .....	23	3.5 Fazit der Analyse .....	58
2.2.1 Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) .....	23	<b>4 Anforderungen an die Datenbasis</b> ...	59
2.2.2 Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN) .....	25	4.1 Einsatzbereiche und Anforderungen ...	59
2.2.3 Bewertung der Fahrtzeit-zuverlässigkeit .....	27	4.2 Auswahl der Datenquellen .....	60
2.3 Methoden zur Ermittlung von Fahrtzeiten und Reisezeiten. ....	27	4.3 Struktur der Datenbasis .....	60
2.3.1 Fahrtzeitermittlung mit verkehrsnachfragebasierter Fahrtzeitmodellierung .....	29	4.4 Auswahl der Relationen .....	62
2.3.2 Fahrtzeitermittlung mit verkehrszustandsbasierter Fahrtzeitmodellierung .....	33	4.4.1 Vorgehensweise .....	62
2.3.3 Fahrtzeitermittlung mit raumdiskreter Fahrtzeitmessung .....	34	4.4.2 Auswahl der zentralen Orte .....	65
2.3.4 Fahrtzeitermittlung mit raumkontinuierlicher Fahrtzeitmessung ...	36	4.4.3 Auswahl der Relationen .....	66
2.3.5 Ermittlung von Reisezeiten. ....	38	4.5 Festlegung von Startort, Zielort und Route .....	68
2.3.6 Aufbereitung von Fahrtzeit- und Reisezeitdatendaten aus FCD .....	39	<b>5 Aufbau der Datenbasis</b> .....	68
2.4 Quellen für Floating-Car-Daten .....	41	5.1 Datenbasis aus streckenbasierten FCD .....	69
		5.1.1 Auswahl des Streckennetzes .....	69
		5.1.2 Datengrundlagen .....	70
		5.1.3 Ermittlung der Fahrtzeiten .....	71
		5.1.4 Ergebnisse .....	72
		5.2 Datenbasis aus relationsbasierten FCD .....	74
		5.2.1 Datengrundlagen .....	75
		5.2.2 Ergebnisse .....	75

5.3	Vergleich der Datenquellen auf Relationsebene . . . . .	76	8.3	Konzept zur Vergleichbarkeit der Datenquellen . . . . .	117
5.3.1	Stufen der Angebotsqualität . . . . .	76	8.4	Ermittlung von Referenzkurven . . . . .	118
5.3.2	Verlustzeiten . . . . .	76	8.5	Fazit . . . . .	119
5.3.3	Fahrtzeitindex . . . . .	79		<b>Literatur</b> . . . . .	120
5.4	Vergleich der Datenquellen auf Streckenebene . . . . .	83		<b>Bilder</b> . . . . .	122
5.4.1	Gewichtung der Fahrtzeiten . . . . .	83		<b>Tabellen</b> . . . . .	126
5.4.2	Verlustzeit . . . . .	84			
5.4.3	Fahrtzeitindex . . . . .	86			
5.5	Vergleich der Verlustzeiten für das Streckennetz und die ausgewählten Relationen . . . . .	88		Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <a href="https://bast.opus.hbz-nrw.de">https://bast.opus.hbz-nrw.de</a> abrufbar.	
<b>6</b>	<b>Konzept zur Vergleichbarkeit der Datenquellen . . . . .</b>	<b>88</b>			
6.1	Validierung der Fahrtzeitdaten einer Datenquelle . . . . .	89			
6.2	Anpassung der Fahrtzeitdaten . . . . .	92			
6.3	Konzepttest an Fahrzeitausprägungen verschiedener Datenquellen . . . . .	93			
<b>7</b>	<b>Ermittlung von Referenzkurven zur Bewertung der Angebots- qualität . . . . .</b>	<b>96</b>			
7.1	Ermittlung geschätzter Referenz- kurven anhand empirischer Werte . . . . .	97			
7.1.1	Vorgehensweise zur Schätzung der Parameter für die Referenz- kurven . . . . .	97			
7.1.2	Ergebnisse der Schätzung . . . . .	98			
7.2	Ermittlung theoretischer Referenz- kurven anhand typischer Netz- eigenschaften . . . . .	105			
7.2.1	Vorgehensweise zur Schätzung der Parameter für die Referenzkurven . . . . .	105			
7.2.2	Ergebnisse der Schätzung . . . . .	113			
7.3	Fazit Referenzkurven . . . . .	115			
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit . . . . .</b>	<b>115</b>			
8.1	Vergleich von Fahrtzeitdaten unterschiedlicher Datenquellen . . . . .	115			
8.2	Aufbau einer Datenbasis . . . . .	116			

## Glossar

### Anbindungszeit

Die Anbindungszeit umfasst im Pkw-Verkehr die Gehzeit von der Haustür bis zum Einstiegsort in das Verkehrsmittel (Zugangszeit), die Gehzeit vom Ausstiegsort aus dem Verkehrsmittel (Abgangszeit) und die Parksuchzeit.

### API

Application Programming Interface. Eine API ist eine Programmierschnittstelle, mit der Daten zwischen Softwareanwendungen ausgetauscht werden können. Anbieter von Fahrtzeitdaten stellen die Daten zum Teil über eine API bereit.

### Beförderungszeit (Fahrtzeit im Verkehrsmittel)

Zeitaufwand für die Fahrt vom Einstieg in das Fahrzeug bis zum Ausstieg aus dem Fahrzeug. Die Beförderungszeit enthält ggf. auch den Zeitaufwand für eine Parkplatzsuche im Kfz-Verkehr oder Wartezeiten im öffentlichen Verkehr. Im Kfz-Verkehr entspricht die Beförderungszeit der Fahrtzeit im Fahrzeug.

### Bewertungsfunktion (Bewertungskurve, Kurve)

Um die Qualität des Verkehrsangebots einer Verbindung zu bewerten, wird in den RIN (2008) ausgewählten Kenngrößen (Luftliniengeschwindigkeit, Umsteigehäufigkeit, Reisezeitverhältnis) mit einer Bewertungsfunktion eine Qualitätsstufe der Angebotsqualität A bis F zugeordnet. Dazu wird eine Bewertungsfunktion genutzt, die von der Luftlinienentfernung abhängig ist. Für jede Kenngröße werden Parameter für 5 Funktionen bereitgestellt, die die Stufen A bis F definieren.

### Datumsbereich

Ein Datumsbereich umfasst eine Menge von Kalendertagen. Ein Datumsbereich ist für die Festlegung der Tage erforderlich, für die historische Fahrtzeiten analysiert werden.

### Fahrtgeschwindigkeit

Mittlere Geschwindigkeit zwischen zwei Punkten im Netz

### Fahrtzeit

Zeitaufwand für eine Ortsveränderung in einem Fahrzeug zwischen zwei Punkten im Netz.

### FCD

Floating-Car-Daten. Positions- und Zeitdaten, die mit einem im Fahrzeug eingebauten GNSS erfasst werden.

### FRC

Functional-Road-Class oder Straßenfunktionsklasse. Die Straßenfunktionsklasse klassifiziert die Strecken eines Straßennetzes. Die Klassifizierung orientiert sich dabei an der Bedeutung der Straße. Die Klassifizierung erfolgt so, dass das Netzmodell auch dann routingfähig bleibt, wenn Straßen einer untergeordneten Straßenfunktionsklasse (z. B. Erschließungsstraßen) aus dem Netz entfernt werden. Eine FRC entspricht nicht genau der in Deutschland verwendeten Straßenklassen.

### FSD

Floating-Smartphone-Daten. Positions- und Zeitdaten, die mit einem in einem Smartphone eingebauten GNSS erfasst werden.

### GNSS

Globales Navigationssatellitensystem. Vorhandene und geplante GNSS sind GPS, Galileo, GLONASS und Beidou.

### HBS

Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS (2015).

### Heatmap

Bezeichnet eine Darstellung, in der Geschwindigkeiten abhängig von Ort und Zeit eingetragen werden.

### Kenngröße (Indikator)

Eine Kenngröße ist ein Maß, das den Zustand eines Systems durch einen Kennwert quantifiziert. Bei-

spiel für Kenngrößen sind die Fahrtzeit, die Verlustzeit oder die Verkehrsleistung. Eine Kenngröße kann eine Eingangsgröße für eine Bewertung sein.

### Luftlinienentfernung

Direkte Entfernung zwischen einem Startort und einem Zielort.

### Luftliniengeschwindigkeit

Die Luftliniengeschwindigkeit ergibt sich aus dem Quotienten von Luftlinienentfernung und Reisezeit.

### Luftlinienverbindung (Verbindung, Relation)

Eine Luftlinienverbindung ist die geradlinige Verbindung von einer Quellzelle zu einer Zielzelle. Eine Menge ausgewählter Luftlinienverbindungen wird in einer Luftlinienmatrix abgelegt.

### Netzabschnitt

Ein Netzabschnitt ist eine Folge von Netzelementen auf einem Verkehrsweg mit gleicher Verbindungsfunktionsstufe und gleicher Kategoriengruppe, also gleicher Kategorie.

### Ort, Punkt, Verkehrszelle

Jede Ortsveränderung hat ein Start und ein Ziel. In einem Routensuchalgorithmus sind Start und Ziel immer als ein Punkt (Knoten) im Raum definiert. Bei Verkehrsmodellen wird dieser Punkt durch eine Verkehrszelle definiert. Bei Orten (z. B. Gemeinden oder POI) wird jedem Ort genau ein Punkt zugeordnet.

### ÖV

Öffentlicher Verkehr

### POI

Point of Interest. Allgemeine Bezeichnung für einen Punkt im Raum, der über eine Bezeichnung (z. B. Flughafen X) referenziert wird. POI können in POI-Kategorien gegliedert werden.

### Reisezeit

Zeitaufwand für eine Ortsveränderung von einem Startort zu einem Zielort (Tür-zu-Tür Zeitaufwand) einschließlich der Zu- und Abgangszeiten.

### RIN

Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN (2008)).

### Route

Eine Route setzt sich aus mehreren Strecken oder Netzabschnitten zusammen, die den räumlichen Verlauf einer Ortsveränderung von einem Startort zu einem Zielort beschreibt. Zwischen zwei Orten kann es mehr als eine Route geben.

### Stufe der Angebotsqualität (SAQ)

Eine Qualitätsstufe dient zur differenzierten Bewertung eines Zielerreichungsgrades. In den RIN werden für die verbindungsbezogenen Angebotsqualitäten sechs verschiedene Qualitätsstufen A bis F unterschieden.

### Strecke

Eine Strecke ist ein Verkehrsweg zwischen zwei Knotenpunkten.

### Streckenzug

Ein Streckenzug ist eine Folge von Strecken. Er kann kürzer oder länger sein als ein Netzabschnitt

### Teilstrecke

Teil einer Strecke. Kommerzielle Anbieter von FCD unterteilen Strecken in Abschnitte, um so Geschwindigkeitsdaten räumlich differenzierter bereit stellen zu können.

### Verbindung (Relation, Quelle-Ziel-Beziehung)

Eine Verbindung ist eine gerichtete Verknüpfung zweier Orte bzw. Verkehrszellen

### Verbindungsfunktionsstufe (VFS)

Die Verbindungsfunktionsstufe kennzeichnet die Bedeutung einer Verbindung von einer Quellzelle zu einer Zielzelle. Sie ergibt sich aus der Bedeutung der zu verbindenden Zellen gemäß dem System der zentralen Orte. Die RIN unterscheiden sechs Verbindungsfunktionsstufen:

0	kontinental
I	großräumig

II	überregional
III	regional
IV	nahräumig
V	kleinräumig

### Verkehrsablaufsqualität

Die Verkehrsablaufsqualität im Straßenverkehr wird durch Kenngrößen quantifiziert, die aus der Fahrzeit der Fahrzeuge abgeleitet werden. Die Verkehrsablaufsqualität kann sich auf eine Teilstrecke, eine Strecke, eine Menge von Strecken oder auf einen Netzabschnitt beziehen.

### Verkehrstag

Ein Verkehrstag bezeichnet eine Menge von Kalendertagen mit einer ähnlichen Verkehrsnachfragestruktur. Beispiele für Verkehrstage sind Werktage Schule, Werktage Ferien, Samstag, Sonn- und Feiertage. Ein Verkehrstag kann mehreren Kalendertagen zugeordnet werden.

### Verkehrszeiten

(SVZ, mHVZ, aHVZ, HVZ, NVZ)

Verkehrszeiten definieren Tageszeiträume, die mit typischen Nachfragesituationen verbunden sind. In dieser Untersuchung werden vier Tageszeiträume mit folgenden Zeiten unterschieden:

- SVZ: Schwachverkehrszeit (00:00 Uhr bis 06:00 Uhr und 20:00 Uhr bis 24:00 Uhr)
- mHVZ: morgendliche Hauptverkehrszeit (06:00 Uhr bis 09:00 Uhr)
- aHVZ: abendliche Hauptverkehrszeit (16:00 Uhr bis 19:00 Uhr)
- HVZ: Hauptverkehrszeit (je nach Lastrichtung entweder mHVZ oder aHVZ)
- NVZ: Normalverkehrszeit (09:00 Uhr bis 16:00 Uhr)

### Zeitraum

(Tageszeitraum, Zeitintervall, Zeitscheibe)

Ein Zeitraum definiert einen Teil eines Tages, der durch einen Anfangszeitpunkt und einen Endzeitpunkt gekennzeichnet ist.

### Zentrale Orte

Die RIN (2008) unterscheidet bei zentralen Orten folgende Zentralitätsstufen, die einer Verbindungsfunktionsstufe zugeordnet werden können:

Zentralität	Verbindungsfunktionsstufe
Metropolregion (MR)	0
Oberzentrum (OZ)	I
Mittelzentren (MZ)	II
Grundzentren (GZ)	III
Hauptort Gemeinde (G)	IV

### Variablenbezeichner

$f_{DQ,i}^{TTI,P}$	Fahrtzeitindex
$t_i^{Curr}$	Ist-Fahrtzeit im Zeitintervall $i$
$t^{Target}$	Soll-Fahrtzeit [min]
$t_{DQ,i}^P$	Perzentil der Fahrtzeit im Zeitintervall $i$ für eine Datenquelle $DQ$
$t_{DQ,i}^{Mean}$	Mittlere Fahrtzeit im Zeitintervall $i$ für eine Datenquelle $DQ$
$v_i$	Fahrtgeschwindigkeit im Zeitintervall $i$
$l$	Länge, auf die sich die Fahrtzeit bezieht



# 1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

## 1.1 Aufgabenstellung

Der Zeitaufwand für eine Ortsveränderung ist die zentrale Kenngröße zur Beschreibung der Angebotsqualität in einem Verkehrsnetz. Der Zeitaufwand ist Grundlage für Bewertungen auf unterschiedlichen planerischen Ebenen von der Bemessung einzelner Verkehrsanlagen, über Netzabschnitte bis hin zu ganzen Relationen und Netzen. Der Zeitaufwand ist außerdem Grundlage für Entscheidungsmodelle der Verkehrsnachfrage (Zielwahl, Moduswahl, Routenwahl), die maßgeblich von Zeiten beeinflusst werden. Für die Planung und Bewertung von Verkehrsanlagen und Verkehrsnetzen ist eine realitätsnahe Abschätzung der heutigen und zukünftigen Zeitaufwände ebenfalls von großer Bedeutung. Für aktuelle oder historische Zeitaufwände können gemessene Geschwindigkeits- und Fahrzeitdaten verschiedener kommerzieller Anbieter herangezogen werden. Änderungen der Zeitaufwände aufgrund von Netz- oder Nachfrageänderungen in einer Prognose können nur mit Modellen abgeschätzt werden. Somit stehen, je nach Anwendungsfall und Region, unterschiedliche Daten Grundlagen zur Verfügung. Damit Fahrzeitdaten für die Planung und die Bewertung genutzt werden können, müssen die Fahrzeitdaten aus unterschiedlichen Quellen vergleichbar sein. Falls das nicht gewährleistet ist, könnten in der Realität identische oder vergleichbare Verkehrszustände in Abhängigkeit der Datenquelle in der Planung unterschiedlich bewertet werden.

Aus dieser Forderung ergibt sich das Ziel des Forschungsvorhabens:

- Es sollen verbindungsbezogene Fahrt- und Reisezeiten im Straßenverkehr mit verschiedenen Methoden (modell- und empiriegestützt) und Datenquellen ermittelt und verglichen werden.
- Aufbauend auf dem Vergleich der Methoden und Datenquellen soll ein Konzept entwickelt werden, mit dem die Zeitdaten einer Datenquelle beurteilt und ggf. korrigiert werden können.
- Es soll eine allgemein zugängliche Datenbasis für verbindungsbezogene Fahrt- und Reisezeiten zwischen zentralen Orten (Metropolregionen, Oberzentren, Mittelzentren) zur Beurteilung der Zeitdaten anderer Datenquellen erstellt werden.

- Auf Grundlage der erstellten Datenbasis sollen Referenzkurven zur Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität für die Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN, 2008) erstellt werden.

## 1.2 Vorgehensweise

Die RIN (2008) stellt eine Methode zur Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität bereit. Diese Bewertungsmethode zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Es werden komplette Verbindungen von der Quelle bis zum Ziel betrachtet. Das schließt die Zu- und Abgangszeiten mit ein.
- Die Bewertungsfunktionen ermöglichen eine Bewertung aller Modi des Personenverkehrs und nicht nur eine Bewertung des Pkw-Verkehrs.
- Die Bewertung einer verbindungsbezogenen Kenngröße erfolgt in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung.
- Die Bewertung des Zeitaufwandes bezieht sich auf die Hauptverkehrszeit.
- Die Bewertung erfolgt mit Bewertungsfunktionen, die 6 Stufen der Angebotsqualität A bis F differenzieren.

Die vorliegende Untersuchung greift die Methode der RIN auf und fokussiert dabei folgende Schwerpunkte:

- Kenngrößen der Verbindungsqualität: Es werden nur zeit- bzw. geschwindigkeitsbezogene Kenngrößen betrachtet.
- Betrachtete Modi: Im Personenverkehr wird nur der Modus Pkw untersucht. Ergänzend zu den RIN werden auch Zeitaufwände für den Modus Lkw einbezogen.

Bild 1-1 gibt einen Überblick über die Vorgehensweise der Untersuchung und die Zuordnung der Arbeitsschritte zu den Kapiteln des Berichts.

- Kapitel 2:  
Es werden ausgewählte Kenngrößen zur Beschreibung der Verbindungsqualität definiert. Dann werden Methoden dargestellt, mit denen diese Kenngrößen bewertet werden können. An-

**Kapitel 2: Stand der Technik zur Erfassung und Bewertung der Verbindungsqualität**

- Kenngrößen zur Beschreibung der Verbindungsqualität
- Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität
- Methoden zur Ermittlung von Fahrtzeiten und Reisezeiten

**Kapitel 3: Analyse ausgewählter Relationen**

Ermittlung verbindungsbezogener Reisezeiten mit verschiedenen Methoden und Datenquellen

- für wenige Relationen (16 Relationen)
- für fünf Datenquellen (Verkehrsnachfragemodell, Google, HERE, INRIX, TomTom)

Vergleich, Validierung und Beurteilung der Datenquellen

**Kapitel 4: Anforderung an die Datenbasis**

- Auswahl der Relationen
- Beschreibung der Attribute eines Datensatzes
- Auswahl einer kommerziellen Datenquelle

**Kapitel 5: Aufbau der Datenbasis**

Bereitstellung einer allgemein zugängliche Datenbasis für verbindungsbezogene Reisezeiten

- 21.500 Relationen zwischen zentralen Orten (MR, OZ, MZ)
- 3 Datenquellen (Verkehrsnachfragemodell, Google, HERE oder INRIX oder TomTom)

**Kapitel 6: Entwicklung eines Konzepts zur Beurteilung der Zeitdaten einer Datenquelle**

- Aussage, ob die Fahrtzeiten einer beliebigen Datenquelle zu den (neuen) RIN-Kurven passen
- Bereitstellung eines Korrekturverfahrens

**Kapitel 7: Ermittlung von Referenzkurven zur Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität**

- Ermittlung geschätzter Referenzkurven anhand von Reisezeiten aus FCD
- Ermittlung theoretischer Referenzkurven anhand typischer Netzeigenschaften

Bild 1-1: Überblick über die Vorgehensweise

schließlich werden Methoden beschrieben, mit denen Fahrtzeiten ermittelt werden können. Um die für das Projekt erforderlichen Fahrt- und Reisezeiten auf Relationsebene ermitteln zu können, werden Floating-Car-Daten (FCD) eingesetzt. Datenquellen für FCD sind am Schluss des Kapitels benannt.

- Kapitel 3:

Um die Aussagekraft unterschiedlicher Datenquellen und Datenanbieter zu untersuchen, werden in einem ersten Schritt Fahrtzeiten für 16 ausgewählte Relationen mit drei unterschiedlichen Methoden und fünf Datenquellen ermittelt:

1. Fahrtzeiten aus dem Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate.

2. Streckenbasierte Fahrtzeiten aus FCD der Anbieter HERE, INRIX und TomTom.
3. Relationsbasierte Fahrtzeiten aus FCD des Anbieters Google.

Für zwei Relationen werden die Fahrtzeitdaten der fünf Datenquellen mit einer eintägigen Fahrtzeitmessung mit Messfahrzeugen und Kennzeichenerfassungssystemen validiert. Für alle 16 Relationen werden die Fahrtzeitdaten der fünf Datenquellen für jede Stunde im Zeitraum 04:00 bis 22:00 Uhr verglichen.

- Kapitel 4:

Aufbauend auf den Ergebnissen der ausgewählten 16 Relationen werden Anforderungen an die Datenbasis formuliert. Die Spezifikation umfasst

- die Auswahl von rund 21.500 Relationen der Verbindungsfunktionsstufen 0 bis III und
  - die Beschreibung des Aufbaus eines Datensatzes.
- Kapitel 5:  
Es wird die Vorgehensweise beim Aufbau der Datenbasis beschrieben. Für die rund 21.500 Relationen werden Fahrzeitdaten mit drei Datenquellen ermittelt (Verkehrsnachfragemodell, Google, HERE oder INRIX oder TomTom<sup>1</sup>).
  - Kapitel 6:  
Es wird eine Methode entwickelt, die es einem RIN-Anwender ermöglicht, Fahrt- bzw. Reisezeitdaten aus einer beliebigen Datenquelle für die Bewertung der Angebotsqualität zu nutzen. Im Idealfall ergibt die Methode eine gute Übereinstimmung mit den Reisezeitdaten der benutzten Datenquelle und den Reisezeitdaten, mit denen die Referenzkurven in Kapitel 7 geschätzt wurden. Bei einer unzureichenden Übereinstimmung müssen die Fahrzeitdaten so korrigiert werden, dass sie mit den Referenzkurven bewertet werden können.
  - Kapitel 7:  
Es werden Referenzkurven für die sektorale Bewertung im Pkw-Verkehr und im Lkw-Verkehr bestimmt. Grundlage für die Ermittlung der Referenzkurven ist die in Kapitel 5 erstellte Datenbasis. Abweichend von den RIN (2008) werden drei Bewertungskurven geschätzt:
    - Luftliniengeschwindigkeit in der Neben- oder Schwachverkehrszeit: Diese Bewertung basiert auf Fahrzeiten ohne größere Zeitverluste durch Kapazitätsengpässe. „Die Verwendung der Fahrzeiten in den Nebenverkehrszeiten ist dann angezeigt, wenn geprüft wird, ob zum Erreichen eines zentralen Ortes grundsätzlich eine geeignete Verbindung im Netz verfügbar ist“ (RIN, Seite 20).
    - Luftliniengeschwindigkeit in der Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen: Diese

Bewertung basiert auf den Fahrzeiten in der Hauptverkehrszeit, in der in Teilen des Netzes Zeitverluste durch Kapazitätsengpässe auftreten. Um eine Unterscheidung in morgendliche und abendliche Hauptverkehrszeit zu vermeiden, wird für die Schätzung der Kurven das Maximum aus beiden Zeiträumen herangezogen. „Die Verwendung der Fahrzeiten in den Hauptverkehrszeiten ist dann angezeigt, wenn geprüft wird, ob eine solche Verbindung für die Verkehrsnachfrage ausreichend bemessen ist“ (RIN, Seite 20).

- Luftliniengeschwindigkeit in der Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen: Diese Bewertung basiert auf den Fahrzeiten in der Hauptverkehrszeit, bei der zufällige Störungen auftreten. Damit sind Aussagen zur Zuverlässigkeit möglich.

Die Parameter der Referenzkurven werden mit zwei Ansätzen bestimmt. Im ersten Ansatz werden die auf FCD basierenden Reisezeiten der Datenbasis für die Schätzung der Parameter genutzt. Im zweiten Ansatz werden für die Parameterschätzung Reisezeiten aus typischen Eigenschaften des Verkehrsnetz abgeleitet.

## 2 Stand der Technik zur Erfassung und Bewertung der Verbindungsqualität

In diesem Kapitel werden zuerst ausgewählte Kenngrößen zur Beschreibung der Verbindungsqualität definiert. Dann werden Methoden dargestellt, mit denen diese Kenngrößen bewertet werden können. Anschließend werden Methoden beschrieben, mit denen Fahrzeiten und Reisezeiten ermittelt werden können. Um die für das Projekt erforderlichen Reisezeiten auf Relationsebene ermitteln zu können, werden Floating-Car-Daten genutzt. Datenquellen für Floating-Car-Daten werden am Schluss des Kapitels benannt.

### 2.1 Kenngrößen zur Beschreibung der Verbindungsqualität

Wichtige Kriterien zur Beurteilung der Angebotsqualität einer Verbindung aus Nutzersicht sind der Zeitaufwand, die Kosten, die Direktheit, die zeitliche Verfügbarkeit, die Zuverlässigkeit, die Sicherheit

<sup>1</sup> Im weiteren Verlauf des Projektes wurde zur Ermittlung der streckenbasierten Fahrzeiten der Anbieter TomTom ausgewählt.

und der Komfort. Jedes Kriterium kann durch eine oder mehrere Kenngrößen messbar und so einer formalisierten Bewertung zugänglich gemacht werden. In dieser Untersuchung liegt der Fokus auf Kenngrößen, die den Zeitaufwand und die Reisezeitzuverlässigkeit einer Verbindung beschreiben.

### 2.1.1 Kenngrößen des Zeitaufwandes

#### Reisezeit und Fahrtzeit

Die RIN bewerten den Zeitaufwand einer kompletten Verbindung (bzw. einer Relation) von der Abfahrt am Startort bis zur Ankunft am Zielort. Der Zeitaufwand einer Reise im Personenverkehr wird als Reisezeit bezeichnet und setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Zugangszeit:  
Gehzeit von der Startadresse bis zum Einstiegs-  
punkt in das Fahrzeug.
- Beförderungszeit:  
Zeitaufwand für die Fahrt vom Einstieg in das  
Fahrzeug bis zum Ausstieg aus dem Fahrzeug.  
Die Beförderungszeit enthält ggf. auch den Zeit-  
aufwand für eine Parkplatzsuche im Kfz-Verkehr  
oder Wartezeiten im öffentlichen Verkehr. Im  
Kfz-Verkehr entspricht die Beförderungszeit der  
Fahrtzeit im Fahrzeug.
- Abgangszeit:  
Gehzeit vom Ausstiegspunkt aus dem Fahrzeug  
bis zur Zieladresse.

Aus der Reisezeit und der Luftlinienentfernung ergibt sich die Luftliniengeschwindigkeit. Sie berücksichtigt implizit die zurückgelegte Entfernung und eignet sich damit für den Vergleich des Zeitaufwandes zwischen Verbindungen unterschiedlicher Entfernung.

Die Fahrtzeit ist allgemein die Zeit, die für eine Ortsveränderung mit einem Verkehrsmittel zwischen zwei beliebigen Punkten im Netz, die zu einem Zeitpunkt oder in einem Zeitraum benötigt wird. Die Fahrtzeit kann sich je nach Lage der betrachteten Punkte auf verschiedene Teile im Netz beziehen. Dabei können die folgenden räumlichen Bezugsebenen unterschieden werden:

- Die Fahrtzeit einer Teilstrecke.
- Die Fahrtzeit einer Strecke zwischen zwei Knotenpunkten des Verkehrsnetzes.

- Die Fahrtzeit eines Netzabschnitts.
- Die Fahrtzeit einer Route.
- Die Fahrtzeit einer Relation. Sie kann sich aus der Fahrtzeit einer oder mehrerer Routen ergeben.

Hinweis: In diesem Projekt wird der Zeitaufwand im Kfz-Verkehr auf der Ebene von Relationen untersucht. Für jede Relation werden Fahrtzeiten unterschiedlicher Ausprägung (Tageszeit, Perzentile, Mittelwerte) ermittelt. Diese Fahrtzeiten enthalten keine Zu- und Abgangszeiten. Erst bei der Ermittlung der Reisezeiten in Kapitel 6 und 7 werden Zu- und Abgangszeiten genutzt. Die Zu- und Abgangszeiten werden in diesem Projekt aus den RIN übernommen (siehe Tabelle 2-9).

#### Einzelfahrtzeit und Fahrtzeitverteilungen

Bei der Analyse von Fahrtzeitdaten muss zwischen der Fahrtzeit eines Einzelfahrzeuges und aggregierten Fahrtzeiten aus Mengen von Einzelfahrzeugen unterschieden werden:

- Fahrtzeit eines Einzelfahrzeugs:  
Für ein Einzelfahrzeug kann aus der Zeit-Weg-Trajektorie des Fahrzeuges die Fahrtzeit für jeden Teil der Fahrt bestimmt werden. Bei der Fahrtzeitermittlung werden nur Zeiten ohne Pause berücksichtigt.
- Fahrtzeitverteilungen:  
Aus den Zeit-Weg-Trajektorien einer Menge von Einzelfahrzeugen ergeben sich Fahrtzeitverteilungen. Aus Zeit-Weg-Trajektorien können Verteilungen für unterschiedliche Bezugsebenen (Teilstrecke, Strecke, Netzabschnitt) und Zeiträume ermittelt werden. Kommerzielle Anbieter von FCD liefern keine Zeit-Weg-Trajektorien von Einzelfahrzeugen, sondern Fahrtzeitverteilungen für Teilstrecken, die nach Tagen und Tageszeiträumen differenziert werden.
- Mittlere Fahrtzeit:  
Die mittlere Fahrtzeit ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der Fahrtzeiten aller Einzelfahrzeuge eines Zeitraums für eine räumliche Bezugsebene.
- Fahrtzeitperzentile:  
Ein Fahrtzeitperzentil entspricht der Fahrtzeit, die von einem Anteil P aller Fahrzeuge unterschritten wird.

Bei der Erstellung einer Fahrtzeitverteilung können die Einzelfahrtzeiten mit zwei Methoden in Klassen zusammengefasst werden:

1. Vorgabe von äquidistanten Perzentilklassen:  
Es werden die Fahrtzeiten angegeben, die die Fahrzeuge eines Perzentils erreichen. Vorteil dieser Methode ist, dass die Klassenanzahl unabhängig von der Streckenlänge ist. Kommerzielle Anbieter von FCD verwenden deshalb diese Methode und stellen Fahrtzeitdaten (bzw. Geschwindigkeitsdaten) als Perzentilklassen von 5 % zur Verfügung.
2. Vorgabe von äquidistanten Fahrtzeiten:  
Es werden die Anteile der Fahrzeuge angegeben, die in eine vorgegebene Fahrtzeitklasse fallen.

### Räumliche Aggregation von Fahrtzeitdaten

Die räumliche Aggregation der Fahrtzeitdaten von Teilstrecken zu längeren Entfernungen ist für mittlere Fahrtzeiten durch einfache Aufsummierung möglich. Fahrtzeitverteilungen können jedoch nur dann aufsummiert werden, wenn sich die beobachteten Häufigkeitsverteilungen durch eine geeignete mathematische Funktion beschreiben lassen. Bei Annahme einer Normalverteilung gilt folgendes:

Wenn die Fahrtzeiten zweier Teilstrecken  $i$  und  $j$  unabhängige, normalverteilte Zufallsgrößen sind mit den Erwartungswerten der Fahrtzeit  $t_i$  bzw.  $t_j$  und den Standardabweichungen  $\sigma_i$  und  $\sigma_j$ , dann ist die Summe der Funktionen  $f(t_i, \sigma_i) + f(t_j, \sigma_j)$  ebenfalls normalverteilt mit dem Erwartungswert  $t_{i+j} = t_i + t_j$  und der Standardabweichung  $\sigma_{i+j} = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$ .

Allerdings ist die Annahme einer Normalverteilung bei Fahrtzeitverteilungen in der Regel nicht gegeben. Eine Aufsummierung von Perzentilen der Fahrtzeit über mehrere Teilstrecken liefert deshalb keine korrekten Ergebnisse. Vermutlich ist der Fehler bei hohen Perzentilen (lange Fahrtzeit, z. B. P90) höher als bei niedrigen Perzentilen (kurze Fahrtzeit, z. B. P 10 %). Auf einem Streckenzug, auf dem sich Fahrzeuge im Verkehrszustand „Stop-and-Go“ bewegen, wird sich ein Fahrzeug auf einer Teilstrecke relativ lange aufhalten und deshalb dem Perzentil P90 zugeordnet. Sobald das Fahrzeug im Stau aufrückt, wird es die folgende Teilstrecke mit einer etwas höheren Geschwindigkeit befahren und deshalb einem Perzentil zugeordnet, das unterhalb

des Perzentils P90 liegt. Es ist deshalb unwahrscheinlich, dass ein Fahrzeug auf einem Streckenzug bei gestauten Verkehrszuständen immer einem hohen Perzentil zugeordnet wird. Bei freiem Verkehrsfluss kann das anders sein, da hier die Fahrzeugführer die Geschwindigkeit entsprechend ihren individuellen Präferenzen wählen können.

Bei der Aufsummierung von Fahrtzeiten über mehrere Teilstrecken ist zu beachten, dass ein Fahrzeug die Teilstrecken nicht immer im selben Zeitraum durchfährt. Das tritt auf bei größeren Entfernungen oder bei einer feinen zeitlichen Auflösung der Fahrtzeitdaten. In diesem Fall darf die Fahrtzeitermittlung nicht statisch, sondern muss dynamisch erfolgen.

- Statische Fahrtzeit:  
Die Fahrtzeit auf einem Netzabschnitt oder einer Route, die sich bei einer Fahrt zu einem bestimmten Zeitpunkt oder Zeitraum ergibt. Hierfür werden für alle überfahrenen Strecken die Fahrtzeiten des gleichen Zeitpunkts oder Zeitraums verwendet.
- Dynamische Fahrtzeit:  
Die Fahrtzeit auf einem Netzabschnitt oder einer Route, die sich für einen bestimmten Abfahrtszeitpunkt ergibt. Hierfür werden für alle überfahrenen Strecken die Fahrtzeiten zum Zeitpunkt der Durchfahrt verwendet.

### Soll-Fahrtzeit, Ist-Fahrtzeit und Verlustzeit

Zur Ermittlung der Verlustzeit und von Kenngrößen der Zuverlässigkeit wird als Bezugsgröße die Soll-Fahrtzeit benötigt. Soll-Fahrtzeiten definieren Zielvorstellungen für eine Bewertung der Fahrtzeit. Die Soll-Fahrtzeit  $t^{Target}$  kann mit zwei grundlegend unterschiedlichen Ansätzen bestimmt werden:

- Soll-Fahrtzeit aus der zu erwartenden Fahrtzeit:  
Die Soll-Fahrtzeit ergibt sich aus der üblicherweise zu erwartenden Fahrtzeit. Sie kann aus Fahrtzeitverteilungen abgeleitet werden. Kenngrößen, die sich auf die zu erwartende Fahrtzeit beziehen, bewerten den Betrieb einer Straße, der von der Nachfrage und zufälligen Störungen beeinflusst wird. Bei der Ableitung der Soll-Fahrtzeit muss entschieden werden, wie mit Überschreitungen der zulässigen Geschwindigkeit oder der Richtgeschwindigkeit auf Autobahnen umgegangen wird.

- Soll-Fahrtzeit aus einer planerisch angemessenen Geschwindigkeit:

Die Soll-Fahrtzeit ergibt sich aus einer Mindestgeschwindigkeit, mit der eine Straßenkategorie aufgrund verkehrsplanerischer Vorstellungen befahren werden soll. Aussagen zur Pkw-Mindestgeschwindigkeit finden sich u. a. in den RIN (2008). Kenngrößen, die sich auf eine planerisch angemessene Geschwindigkeit beziehen, bewerten die Qualität absolut, d. h. bezogen auf einen angestrebten Zustand des Straßennetzes.

Das HBS (2015) bezieht sich bei der Bewertung von Netzabschnitten auf diese Soll-Fahrtzeiten.

Soll-Fahrtzeiten können sich als konstanter Wert  $t^{Target}$  auf alle Zeiträume eines Tages beziehen oder als tageszeitabhängiger Wert  $t_i^{Target}$  für einen Zeitraum  $i$  definiert werden. Die Verwendung eines tageszeitabhängigen Wertes ist dann sinnvoll, wenn Ist-Fahrtzeiten einer Hauptverkehrszeit mit den üblicherweise in dieser Hauptverkehrszeit zu erwartenden Fahrtzeiten verglichen werden sollen.

Kategorie	Formelbezeichner	Bezeichnung der Fahrtzeit	Definition
Soll-Fahrtzeit	$t^{Target}$	erwartete Soll-Fahrtzeit	Üblicherweise zu erwartende Fahrtzeit in einem Zustand ohne Störungen. Hierzu kann z. B. der Median der Fahrtzeit genutzt werden: $t^{Target} = MIN(t_i^{P50})$
	$t_{i=HVZ}^{Target}$	erwartete Soll-Fahrtzeit in der Hauptverkehrszeit	Üblicherweise in der Hauptverkehrszeit zu erwartende Fahrtzeit, die regelmäßige Störungen umfasst: $t_{i=HVZ}^{Target} = t_{i=HVZ}^{P50}$
Ist-Fahrtzeit	$t^{Free}$	Fahrtzeit bei freiem Verkehrsfluss	Fahrtzeit in einem Zustand ohne Störungen und geringer Verkehrsnachfrage. Verkehrsteilnehmer können die Geschwindigkeit frei wählen. Beispiel für die Definition der Fahrtzeit bei freiem Verkehrsfluss: $t^{Free} = t_i^{P15}$ Fahrtzeit aus dem Perzentil P15 eines Untersuchungszeitraums $t^{Free} = MIN_{i \in I}(t_i^{P50})$ Fahrtzeit aus dem Zeitraum mit der geringsten Median-Fahrtzeit
	$t_i^{Mean}$	mittlere Fahrtzeit	Arithmetisches Mittel der Fahrtzeit über alle Fahrzeuge in einem Zeitraum $i$ .
	$t_i^{Curr}$	Ist-Fahrtzeit	Ist-Fahrtzeit in einem Zeitraum $i$ . Die Ist-Fahrtzeit muss in Abhängigkeit der Fragestellung definiert werden: $t_i^{Curr} = t_i^P$
Verlustzeit	$t_i^{Delay,P50}$	planmäßige Verlustzeit (regelmäßige oder systematische Verlustzeit)	Verlustzeit, die in einem Zeitraum $i$ aufgrund regelmäßiger Störungen erwartet werden kann: $t_i^{Delay,P50} = MAX(t_i^{P50} - t^{Target}, 0)$
	$t_i^{Delay,Mean}$	mittlere Verlustzeit	Verlustzeit aus dem arithmetischen Mittel der Fahrtzeit über alle Fahrzeuge in einem Zeitraum $i$ : $t_i^{Delay,Mean} = MAX(t_i^{Mean} - t^{Target}, 0)$
	$t_i^{Delay,P90}$	unplanmäßige Verlustzeit	Verlustzeit, die in einem Zeitraum $i$ aufgrund regelmäßiger und unregelmäßiger Störungen erwartet werden kann: $t_i^{Delay,P90} = MAX(t_i^{P90} - t_{i=HVZ}^{Target}, 0)$
$i \in I$	Menge $I$ der Zeiträume $i$ eines Tages (oder eines längeren Untersuchungszeitraums)		

Tab. 2-1: Bezeichnung von Fahrtzeiten

Die Ist-Fahrtzeit  $t_i^{Curr}$  bezeichnet im Gegensatz zur Soll-Fahrtzeit die Fahrtzeit in einem bestimmten Zeitraum  $i$ . Die Bezeichnung Ist-Fahrtzeit enthält noch keine Aussagen darüber, ob die Fahrtzeit einem Mittelwert  $t_i^{Curr} = t_i^{Mean}$  oder einem Perzentil  $t_i^{Curr} = t_i^P$  entspricht und ob sie sich auf einen konkreten Kalendertag oder einen Verkehrstag (z. B. Menge der Werktage Schule Mo-Fr) bezieht.

Die Verlustzeit  $t_i^{Delay}$  ergibt sich aus der Differenz zwischen der Ist-Fahrtzeit und der Soll-Fahrtzeit:

$$t_i^{Delay} = \text{MAX}(t_i^{Curr} - t^{Target}, 0)$$

Abhängig von der Definition der Ist-Fahrtzeit und der Soll-Fahrtzeit kann die Verlustzeit als planmäßige Verlustzeit, als mittlere Verlustzeit oder als unplanmäßige Verlustzeit bezeichnet werden.

Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die Bezeichnung von Fahrtzeiten, die in dieser Untersuchung verwendet werden. Die Untersuchung betrachtet tatsächliche gemessene Fahrtzeiten und nicht Fahrtzeiten aus planerisch angemessenen Geschwindigkeiten. Deshalb wird die Soll-Fahrtzeit aus der zu erwartenden Fahrtzeit abgeleitet. In der Tabelle wird bei tageszeitabhängigen Fahrtzeiten ein Index  $i$  verwendet, der den Zeitraum des Tages angibt, auf den sich die Fahrtzeiten beziehen.

### Repräsentative Fahrtzeiten

Aufgrund der Fahrzeugeigenschaften und des individuellen Fahrverhaltens von Personen im Straßenverkehr variieren die Fahrtzeiten von Einzelfahrzeugen auch bei sonst gleichen Randbedingungen. Für die Analyse der Fahrtzeiten ist es deshalb sinnvoll, die Fahrtzeiten von Einzelfahrzeugen zu aggregieren. Für den Begriff der repräsentativen Fahrtzeit gibt es keine verbindliche Definition. Allgemein kann für eine repräsentative Fahrtzeit Folgendes gefordert werden:

- Sie bezieht sich auf einen Zeitraum. Übliche Zeiträume für eine Analyse von Teilstrecken sind 5 Minuten, 15 Minuten, 60 Minuten, eine Verkehrszeit (z. B. morgendliche Hauptverkehrszeit) oder ein ganzer Verkehrstag. Im Level of Service Concepts for Travel Time Reliability (SHRP 2 L08 (2012) wird z. B. ein Zeitraum von 15 Minuten vorgeschlagen.
- Sie umfasst nur Fahrzeuge einer Fahrzeugklasse (Pkw oder Lkw).

- Sie umfasst nur Fahrzeuge, die auf einer vorgegebenen Route ohne Pause verkehren.

Je nach Aufgabenstellung können unterschiedliche Definitionen der repräsentativen Fahrtzeit sinnvoll sein:

- Repräsentative Fahrtzeiten für die Ermittlung von Verlustzeiten und Verlustzeitkosten:  
Für die Ermittlung von realitätsnahen Verlustzeiten (Stauzeiten) und Verlustzeitkosten (Staukosten) müssen mittlere Fahrtzeiten verwendet werden, die mit der Zahl der Fahrzeuge gewichtet wurden.
- Repräsentative Fahrtzeiten für die Ermittlung der zu erwartenden Soll-Fahrtzeit:  
Wird die Soll-Fahrtzeit als ein konstanter Wert für den gesamten Tag definiert, soll die Soll-Fahrtzeit den Zeitaufwand beschreiben, der in einem Zustand ohne Störungen und mit geringer Verkehrsnachfrage zu erwarten ist. Soll-Fahrtzeiten werden deshalb in diesem Fall in der Schwachverkehrszeit ermittelt. Durch die Wahl eines geeigneten Perzentils und durch den Abgleich mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit werden sehr schnelle Fahrzeuge nicht berücksichtigt. FRIEDRICH et al. (2015) schlagen für die Ermittlung der Fahrtzeit eines ganzen Tages das 15%-Perzentil vor. Alternativ erscheint der Median der Schwachverkehrszeit als eine gut erklärbare Größe, wenn sichergestellt ist, dass die Fahrtzeitverteilung keine Lkw beinhaltet. Um den Einfluss des Perzentils auf die Soll-Fahrtzeit zu analysieren, werden in Kapitel 5.4 Soll-Fahrtzeiten für das 15%- und das 50%-Perzentil verglichen.
- Repräsentative Fahrtzeiten für die Ermittlung der Ist-Fahrtzeit:  
Die Ist-Fahrtzeit soll den tatsächlichen Zeitaufwand in einem Zeitraum beschreiben. Auch hierfür ist der Median eine geeignete Größe. Für Zuverlässigkeitsanalysen ist zusätzlich die Analyse weiterer Perzentile sinnvoll (z. B. P90). Dabei muss aber sichergestellt sein, dass die so ermittelten Fahrtzeitperzentile – wie oben im Abschnitt „Räumliche Aggregation von Fahrtzeitdaten“ erläutert – nicht das Ergebnis einer einfachen Aufsummierung von Perzentilen einzelner Teilstrecken sind.

Bei der Verwendung mittlerer Fahrtzeiten ist zu beachten, dass der Mittelwert stark von einzelnen

Ausreißern beeinflusst werden kann. Dass ist beim Median nicht der Fall. Da der Median aber anders als der Mittelwert nicht einfach zeitlich aggregiert und räumlich aufsummiert werden kann, ist der Mittelwert mathematisch vorteilhafter. Deshalb ist es vermutlich sinnvoll, bei der Mittelwertbildung aus Einzelfahrtzeiten besonders langsame Fahrzeuge z. B. über die Vorgabe eines Perzentilwerts herauszufiltern.

### 2.1.2 Kenngrößen der Zuverlässigkeit

Kenngrößen der Zuverlässigkeit quantifizieren die Abweichung der tatsächlichen Fahrtzeit (Ist-Fahrtzeit) von einer zu definierenden Soll-Fahrtzeit. In TU (2008) werden vier Arten der Zuverlässigkeit unterschieden, die hier nach FRIEDRICH et al. (2015) dargestellt sind:

- **Netzzuverlässigkeit:**  
Die Netzzuverlässigkeit (connectivity reliability) gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit es für zwei Punkte im Netz mindestens eine Route gibt, die von den Verkehrsteilnehmern genutzt werden kann. Dabei geht es um die Verfügbarkeit von Alternativrouten für den Fall, dass eine oder mehrere Strecken im Netz gesperrt werden müssen (Naturkatastrophe, Vollsperrung wegen Baustelle oder Unfall).
- **Kapazitätsszuverlässigkeit:**  
Die Zuverlässigkeit der Kapazität (capacity reliability) gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die komplette Kapazität eines Netzelementes zur Verfügung steht bzw. wie häufig und in welchem Umfang es zu Kapazitätsreduktionen kommt. Kapazitätsreduzierungen können in Straßennetzen beispielsweise durch die Sperrung einzelner Fahrstreifen (Baustelle, Unfall) oder aufgrund von Wetterereignissen auftreten.
- **Zuverlässigkeit des Verkehrsverhaltens:**  
Die Zuverlässigkeit des Verkehrsverhaltens (behavioural reliability) beschreibt die Regelmäßigkeit mit der die Verkehrsteilnehmer ihre Ortsveränderungen (Anzahl, Ziel-, Verkehrsmittel-, Abfahrtszeit- und Routenwahl) durchführen und die Regelmäßigkeit im Fahrverhalten (Nutzung von Zeitlücken, Fahrzeugfolgeabstand).
- **Zuverlässigkeit der Fahrtzeit:**  
Die Zuverlässigkeit der Fahrtzeiten (travel time reliability) wird aus der Verteilung der Fahrzei-

ten für eine Strecke, einen Netzabschnitt oder eine Quelle-Ziel-Verbindung abgeleitet.

In diesem Forschungsprojekt geht es um Kenngrößen zur Bewertung der Verbindungsqualität. Deshalb steht die Fahrtzeitzuverlässigkeit im Vordergrund. Die Fahrtzeitzuverlässigkeit wird allerdings durch die Kapazitätsszuverlässigkeit (Verfügbarkeit aller Fahrstreifen) und die Verhaltenszuverlässigkeit (Schwankungen der Verkehrsnachfrage) beeinflusst. In BENNECKE et al. (2011); FRIEDRICH et al. (2015); LOHMILLER (2014) werden folgende drei Ansätze zur Quantifizierung der Fahrtzeitzuverlässigkeit unterschieden:

#### 1. Zuverlässigkeit aus der Streuung der Fahrtzeiten:

Diese Zuverlässigkeit beschreibt das Ausmaß der Streuung über die Verteilung der Fahrtzeiten. Eine geringe Streuung steht für eine hohe Zuverlässigkeit und eine hohe Streuung für eine geringe Zuverlässigkeit. Die Streuung der Fahrtzeit kann durch verschiedene Kenngrößen beschrieben werden. Beispiele hierfür sind die Standardabweichung, der Variationskoeffizient, der Fahrtzeitindex, die Fahrtzeitunzuverlässigkeit VAN LINT et al. (2008), der Bufferindex und der Misery-Index LOMAX et al. (2003). Der Fahrtzeitindex quantifiziert die Streuung der Fahrtzeit durch die Angabe einer unteren und oberen Grenze für die Fahrtzeit. Die untere Grenze entspricht einer Soll-Fahrtzeit. Die obere Grenze wird durch einen Perzentil-Wert festgelegt. Wird für die Soll-Fahrtzeit nicht die in der Schwachverkehrszeit erwartete Fahrtzeit (z. B. Median der Schwachverkehrszeit) herangezogen, sondern die in der Hauptverkehrszeit erwartete Fahrtzeit (z. B. Median der Hauptverkehrszeit), dann kann der Fahrtzeitindex als Zuverlässigkeitsindex bezeichnet werden. Der Zuverlässigkeitsindex gibt an, in welchem Umfang eine zu einer gewissen Tageszeit erwartete Fahrtzeit überschritten wird.

#### 2. Zuverlässigkeit aus der Ausfallsicherheit:

Die Ausfallsicherheit gibt an, wie häufig eine Mindestqualität, z. B. die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit unterschritten wird. Sie entspricht einer Pünktlichkeit bzw. einer Verspätungswahrscheinlichkeit bezogen auf eine Soll-Fahrtzeit analog zu fahrplangebundenen öffentlichen Verkehrssystemen.

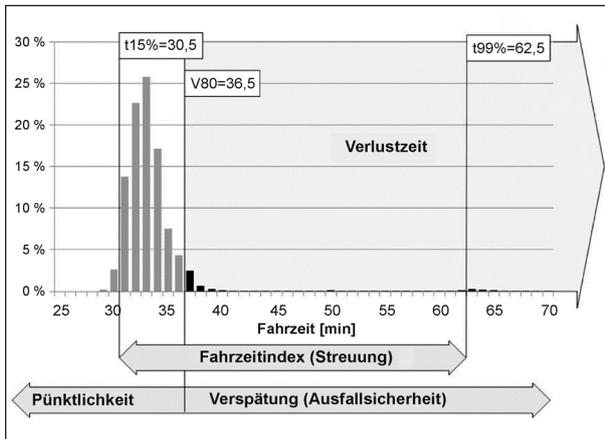


Bild 2-1: Ansätze zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit  
FRIEDRICH et al. (2015)

3. Zuverlässigkeit aus der Verlustzeit:

Die Verlustzeit berücksichtigt neben der Pünktlichkeit zusätzlich die Schwere einer Verspätung, d. h. die Abweichung von der Soll-Fahrzeit. Die Verlustzeit ergibt sich aus der Differenz der aktuellen Ist-Fahrzeit und der Soll-Fahrzeit. Um die Verlustzeit zu bewerten, wird sie auf die zurückgelegten Fahrzeugkilometer bzw. auf die Streckenlänge normiert und in der Einheit Sekunden/Kilometer dargestellt. Als Bezugsgrößen werden dieselben Mindestgeschwindigkeiten wie für die Bestimmung der Verspätungen angesetzt.

Die oben beschriebenen Ansätze zur Bewertung der Zuverlässigkeit sind in Bild 2-1 beispielhaft visualisiert. Nach SIGNIFICANCE und NEA (2012) können die Kenngrößen aus Ansatz 1 als Mean-Dispersion-Modelle bezeichnet werden. Die Ansätze 2 und 3 werden als Scheduling-Modelle bezeichnet.

2.2 Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität

Für die Bewertung der Angebotsqualität von Verbindungen und Netzabschnitten stehen in den deutschen Regelwerken mit der RIN (2008) und dem HBS (2015) Ansätze zur Verfügung. In Bild 2-2 ist der Zusammenhang zwischen den Ansätzen der RIN und dem HBS dargestellt. Zusätzlich zu diesen Regelwerken liegen auch Ansätze aus Forschungsberichten vor.



Bild 2-2: Zusammenhang zwischen der Bewertung der Verkehrsqualität von Einzelanlagen (QSV) und der Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten (SAQN) für den Kfz-Verkehr gemäß dem HBS sowie der Bewertung der Angebotsqualität von Verbindungen (SAQV) gemäß den RIN (2008). Bildquelle HBS (2015).

2.2.1 Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)

Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS (2015) enthält standardisierte Verfahren zur Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs. Darüber hinaus werden auch Verfahren zur Ermittlung der benötigten Verkehrsnachfrage (Bemessungsverkehrsstärke) dargestellt. Die Bemessungsverkehrsstärke wird im HBS als die Verkehrsstärke einer n-ten Stunde der Dauerlinie stündlicher Verkehrsstärken eines Jahres definiert. Es werden somit die n höchstbelasteten Stunden eines Jahres beurteilt. Besondere äußere Bedingungen, wie Baustellen, Unfälle oder besondere Wetterereignisse werden nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass grundsätzlich trockene Fahrbahnen und Helligkeit vorliegen und, dass die Kapazität nicht durch Störungen beeinflusst wird.

Die Qualität des Verkehrsablaufs von Einzelanlagen wird im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen mit sechs Qualitätsstufen (QSV) bewertet. Diese Qualitätsstufen werden mit den Buchstaben A bis F untergliedert. Während QSV A für die beste Qualität steht, steht QSV F für die schlechteste Qualität, bei der die Funktionsfähigkeit der Einzelanlage als nicht mehr funktionsfähig definiert wird. Je nach Art der Verkehrsanlage werden verschiedene Kriterien zur Beschreibung

der Verkehrsqualität verwendet. Diese Kriterien werden in Tabelle 2-2 in Abhängigkeit der Art der Verkehrsanlage dargestellt.

Um die Angebotsqualität einer Folge von Einzelanlagen zu bewerten, wird im HBS die mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit für einen Netzabschnitt berechnet und mit einer angestrebten Fahrtgeschwindigkeit verglichen. Die mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit ergibt sich aus der Berechnung der Verlustzeit bzw. der Fahrtgeschwindigkeit für jede Verkehrsanlage. Daraus resultiert der Fahrtgeschwindigkeitsindex für den zu untersuchenden Netzabschnitt. Der Fahrtgeschwindigkeitsindex ist der Quotient aus der in der Bemessungsstunde unter den gegebenen oder geplanten Randbedingungen auf einem Netzabschnitt zu erwartenden mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit und einer gemäß der

RIN (2008) von der Straßenkategorie abhängigen, angestrebten mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeit. Durch eine Zuordnung des Fahrtgeschwindigkeitsindex zu den sechs Stufen ( $SAQ_N$  Stufen der Angebotsqualität auf Netzabschnitten) wird der Netzabschnitt bewertet. Die Länge des Netzabschnitts hat keinen direkten Einfluss auf die Bewertung der Angebotsqualität. Allerdings sind die Abstände zwischen den benachbarten Grenzwerten bei inner- und außerörtlichen Netzabschnitten unterschiedlich. In Tabelle 2-3 ist eine Übersicht über die Stufen der Angebotsqualität dargestellt.

Art der Verkehrsanlage	Kriterium	Abkürzung
Strecken von Autobahnen	Auslastungsgrad	$x$
Planfreie Knotenpunkte an Autobahnen	Auslastungsgrad	$x$
Strecken von Landstraßen	Verkehrsdichte	$k$
Planfreie Knotenpunkte an Landstraßen	Verkehrsdichte	$k$
Plangleiche Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage	Wartezeit	$t_W$
Plangleiche Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage	Wartezeit	$t_W$
Strecken von Hauptverkehrsstraßen	Verkehrsdichte	$k$
Anlagen für den Radverkehr	Störungsrate	$S$
Anlagen für den Fußgängerverkehr	Verkehrsdichte	$k$
Abfertigungsanlagen für den ruhenden Verkehr	Wartezeit (Ein-/Ausfahrtzeit)	$t_D$

Tab. 2-2: Kriterien zur Beschreibung der Verkehrsqualität für verschiedene Einzelanlagen nach HBS (2015)

$SAQ_N$	Fahrtgeschwindigkeitsindex [-]				
	Autobahnen	Landstraßen	Stadtstraßen		
			Kategoriengruppe VS		Kategoriengruppe HS
			im Vorfeld bebauter Gebiete	innerhalb bebauter Gebiete	
A	$\geq 1,25$	$\geq 1,25$	$\geq 1,25$	$\geq 1,50$	$\geq 2,00$
B	$\geq 1,20$	$\geq 1,20$	$\geq 1,20$	$\geq 1,25$	$\geq 1,50$
C	$\geq 1,10$	$\geq 1,10$	$\geq 1,10$	$\geq 1,15$	$\geq 1,25$
D	$\geq 1,00$	$\geq 1,00$	$\geq 1,00$	$\geq 1,00$	$\geq 1,00$
E	$\geq 0,85$	$\geq 0,85$	$\geq 0,85$	$\geq 0,80$	$\geq 0,75$
F	$< 0,85$	$< 0,85$	$< 0,85$	$< 0,80$	$< 0,75$

Tab. 2-3: Stufen der Angebotsqualität eines Netzabschnitts ( $SAQ_N$ ) in Abhängigkeit vom Fahrtgeschwindigkeitsindex nach HBS (2015)

## 2.2.2 Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN)

Die Richtlinien für integrierte Netzgestaltung RIN (2008) bieten Methoden zur funktionalen Gliederung von Verkehrsnetzen, Methoden und Orientierungswerte zur Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität und Vorgaben zur Gestaltung einzelner Netzelemente.

### Funktionale Gliederung

Für die funktionale Gliederung des Verkehrsnetzes werden Gemeinden nach ihrer raumordnerischen Bedeutung eingeteilt. Unterschieden wird hierbei in verschiedenen Stufen in Gemeinden mit zentraler Bedeutung und in Gemeinden ohne zentralörtliche Aufgaben. Die RIN unterscheidet folgende verschiedene Stufen der zentralen Orte:

- Metropolregion (MR) mit internationaler bzw. nationaler Ausstrahlung;
- Oberzentren (OZ) als Verwaltungs-, Versorgungskultur- und Wirtschaftszentren für die höhere spezialisierte Versorgung;
- Mittelzentren (MZ) als Zentren zur Deckung des gehobenen Bedarfs bzw. des selteneren spezialisierten Bedarfes und als Schwerpunkte für Gewerbe, Industrie und Dienstleistungen;
- Grundzentren (GZ), Unter- und Kleinzentren dienen als Zentren der Grundversorgung, der Deckung des täglichen Bedarfes für den jeweiligen Nahbereich.

Zur Festlegung der Bedeutung der Verbindung zwischen zwei zentralen Orten werden in den RIN

sechs Verbindungsfunktionsstufen festgelegt. Die Bedeutung und damit die Verbindungsfunktionsstufe ergibt sich aus der Bedeutung der zentralen Orte, welche miteinander verbunden werden. In Tabelle 2-4 sind die Verbindungsfunktionsstufen dargestellt.

### Bewertung der Verbindungsqualität

Für die Bewertung einer kompletten Ortsveränderung wird die Angebotsqualität in den RIN in sechs Qualitätsstufen (SAQ<sub>V</sub> = Stufen der Angebotsqualität auf Verbindungen) unterteilt. Die RIN bietet Bewertungsfunktionen für folgende Kenngrößen:

- Luftliniengeschwindigkeit
- Reisezeitverhältnis
- Umwegfaktor
- Umsteigehäufigkeit

Die Bewertungsfunktionen gehen davon aus, dass die Bewertung von der Luftlinienentfernung abhängt. Die Bewertungsfunktionen ermöglichen damit einen Vergleich der Angebotsqualität von Relationen unterschiedlicher Entfernungen. Bei der Ermittlung der Fahrtzeiten sollen im motorisierten Individualverkehr Fahrtzeiten in der Hauptverkehrszeit ohne Störungen durch Arbeitsstellen oder zufällige Ereignisse verwendet werden. Grundlage für die Bewertungsfunktionen der RIN sind modellbasierte Pkw-Reisezeiten für knapp 10.000 Relationen. Die Relationen wurden 2004 auf ausgewählten Relationen mit damals verfügbaren Routenplanern validiert. Die Reisezeiten sind statische Fahrtzeiten im belasteten Netz eines Tagesmodells, d. h. bei langen Relationen wird für die gesamte Route die Geschwindigkeit der Hauptverkehrszeit unterstellt.

Verbindungsfunktionsstufe		Einstufungskriterien		Beschreibung
Stufe	Bezeichnung	Versorgungsfunktion	Austauschfunktion	
0	Kontinental	–	MR – MR	Verbindung zwischen Metropolregionen
I	Großräumig	OZ – MR	OZ – OZ	Verbindung von Oberzentren zu Metropolregionen und zwischen Oberzentren
II	Überregional	MZ – OZ	MZ – MZ	Verbindung von Mittelzentren zu Oberzentren und zwischen Mittelzentren
III	Regional	GZ – MZ	GZ – GZ	Verbindung von Grundzentren zu Mittelzentren und zwischen Grundzentren
IV	Nahräumig	G – GZ	G – G	Verbindung von Gemeinden/Gemeindeteilen ohne zentralörtliche Funktion zu Grundzentren und Verbindung zwischen Gemeinden/Gemeindeteilen ohne zentralörtliche Funktion
V	Kleinräumig	GRST – G	–	Verbindung von Grundstücken zu Gemeinden/Gemeindeteilen ohne zentralörtliche Funktion

Tab. 2-4: Verbindungsfunktionsstufen für Verbindungen nach RIN (2008, Tabelle 4)

Bild 2-3 und Bild 2-4 zeigen die Bewertungsfunktionen, die für diesen Bericht von Bedeutung sind. Die

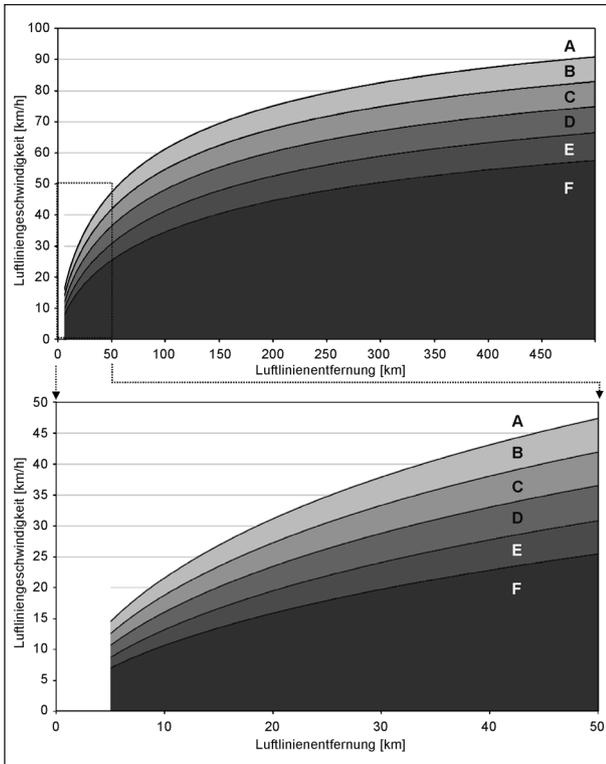


Bild 2-3: Qualitätsstufen für die Luftliniengeschwindigkeit im Pkw-Verkehr nach RIN (2008, Bild 15)

Bewertungsfunktionen für die Luftliniengeschwindigkeit im Pkw-Verkehr Bild 2-3 sollen neu geschätzt werden. Da die Luftliniengeschwindigkeit von der Umwegigkeit abhängt, werden außerdem die Bewertungsfunktionen für die Kenngröße Umwegfaktor überprüft.

**Qualitätsvorgaben für Netzelemente**

Tabelle 2-5 enthält Zielgrößen für die angestrebten mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten auf Netzabschnitten im Bemessungszeitraum nach dem HBS.

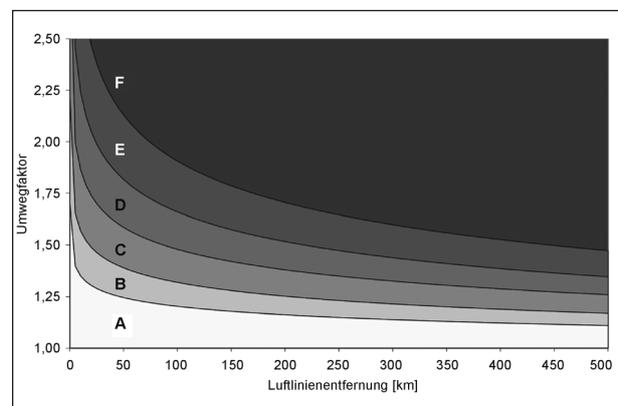


Bild 2-4: Qualitätsstufen zur Bewertung der Umwegfaktoren nach RIN (2008, Bild 26)

Kategoriengruppe		Kategorie		Standardentfernungsbereich [km]	angestrebte Pkw-Fahrtgeschwindigkeit [km/h]	
AS	Autobahnen	AS 0/I	Fernautobahn	40 – 500	90 – 110	
		AS II	Überregionalautobahn	10 – 70	80 – 100	
			Stadtautobahn		70 – 90	
LS	Landstraßen	LS I	Fernstraße	40 – 160	80 – 90	
		LS II	Überregionalstraße	10 – 70	60 – 70	
		LS III	Regionalstraße	5 – 35	50 – 60	
		LS IV	Nahbereichsstraße	bis 15	40 – 50	
		LS V	Anbindungsstraße	-	keine	
VS	anbaufreie Hauptverkehrsstraßen	VS II	anbaufreie Hauptverkehrsstraße	-	im Vorfeld bebauter Gebiete	50 – 60
					innerhalb bebauter Gebiete	40 – 50
		VS III	anbaufreie Hauptverkehrsstraße		im Vorfeld bebauter Gebiete	40 – 50
					innerhalb bebauter Gebiete	30 – 40
HS	angebaute Hauptverkehrsstraßen	HS III	Ortsdurchfahrt, innergemeindliche Hauptverkehrsstraße	-	20 – 25	
		HS IV	Ortsdurchfahrt, innergemeindliche Hauptverkehrsstraße	-	15 – 20	
ES	Erschließungsstraßen	ES IV	Sammelstraße	-	-	
		ES V	Anliegerstraße	-	-	

Tab. 2-5: Angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten nach RIN (2008, Tabelle 13)

Diese beinhalten auch die notwendigen Wartezeiten an Knotenpunkten. Die RIN gehen davon aus, dass mit diesen Geschwindigkeiten im Pkw-Verkehr eine angemessene verbindungsbezogene Angebotsqualität erreicht werden kann.

### 2.2.3 Bewertung der Fahrtzeitzuverlässigkeit

Für die Bewertung der Fahrtzeitzuverlässigkeit gibt es zwei grundlegende Ansätze:

1. Einbeziehung der Zuverlässigkeit als eine Nutzenkomponente im Rahmen von Nutzen-Kosten-Untersuchungen: Sowohl die Verlustzeit als auch der erforderliche Zeitpuffer, der für eine pünktliche Ankunft am Ziel eingeplant werden muss, führt zu zusätzlichen Kosten. Dabei haben neben der korrekten Ermittlung der Fahrtzeiten die verwendeten Zeitkostensätze einen Einfluss auf das Ergebnis. SIGNIFICANCE UND NEA (2012) untersuchen Möglichkeiten, um im Zusammenhang mit dem Bundesverkehrswegeplan in Deutschland die Zuverlässigkeit von Transportzeiten in die Nutzen-Kosten-Analyse von Infrastrukturprojektanträgen aufzunehmen. Sie schlagen als eine Lösung vor, die Standardabweichung als Maß für die Unzuverlässigkeit zu verwenden. Darauf aufbauend entwickelten GEISTEFELDT et al. (2014) ein Modell, dass die Standardabweichung der überlastungsbedingten Reisezeitverluste auf Strecken von Autobahnen in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad ermittelt. Hierfür führen sie eine Ganzjahresanalyse mit dem Programm KAPASIM durch.
2. Bewertung von Kenngrößen der Zuverlässigkeit mit Qualitätsstufen A bis F analog zum HBS und zu den RIN: FRIEDRICH et al. (2015) entwickelten für die Kenngrößen Fahrtzeitindex, Ausfallsicherheit und Verlustzeit aus der Analyse empirischer Daten Vorschläge für die Bewertung der Zuverlässigkeit von Netzabschnitten. Für die Ermittlung der Grenzen der Qualitätsstufen wird eine längenabhängige rationale Funktion verwendet. Die Abhängigkeit der Bewertung von der Länge ergibt sich aus der Vorstellung, dass sich bei kürzeren Entfernungen Verlustzeiten aufgrund von Störungen negativer auf die erreichbare Geschwindigkeit auswirken als bei großen Entfernungen. Hier kann der Zeitverlust möglicherweise kompensiert werden oder ist bezogen auf die längere Fahrtzeit relativ unbedeutend. Ein Ergebnis der Untersuchung ist es, dass

für eine vollständige Bewertung der Zuverlässigkeit mehrere Kenngrößen bewertet werden müssen.

## 2.3 Methoden zur Ermittlung von Fahrtzeiten und Reisezeiten

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über gängige Verfahren zur Ermittlung von Geschwindigkeitsdaten bzw. Fahrtzeitdaten. Geschwindigkeits- und Fahrtzeitdaten können direkt gemessen werden oder mit Modellen bestimmt werden:

- **Fahrtzeitmessung:**  
Die Fahrtzeitmessung umfasst Verfahren der Fahrtzeitermittlung, bei denen die Fahrtzeiten direkt gemessen werden. Diese Verfahren enthalten immer eine Modellierungskomponente, da die Messdaten unter Nutzung von Regeln aufbereitet werden.
- **Fahrtzeitmodellierung:**  
Die Fahrtzeitmodellierung umfasst Verfahren der Fahrtzeitermittlung, bei denen die Fahrtzeiten mit einem Modell berechnet werden. Diese Verfahren nutzen immer Messdaten als Eingangsgrößen.

Im Folgenden werden vier Verfahrensklassen für die Fahrtzeitermittlung unterschieden:

- **Fahrtzeitermittlung mit verkehrsnachfragebasierter Fahrtzeitmodellierung:**  
Die Fahrtzeit wird aus den Eingangsgrößen Verkehrsnachfrage und Verkehrsangebot mit einem Fahrtzeitermittlungsmodell berechnet. Als Fahrtzeitermittlungsmodell kommen auslastungsabhängige Modelle, Warteschlangenmodelle oder Verkehrsflussmodelle zum Einsatz. Die Verkehrsnachfrage kann das Ergebnis einer Messung oder einer Verkehrsnachfrageberechnung sein. Sie kann nach Fahrzeugeigenschaften und bei mikroskopischen Verkehrsflussmodellen zusätzlich durch Fahrereigenschaften genauer beschrieben werden. Die Verkehrsnachfrage bestimmt die zeitabhängigen Zuflüsse in das Netz. Das Verkehrsangebot wird durch die Eigenschaften der Verkehrsanlagen beschrieben. Strecken haben eine zulässige Geschwindigkeit und eine Fahrstreifenanzahl. Bei Knotenpunkten wird zusätzlich die Art der Steuerung berücksichtigt.

- Fahrtzeitermittlung mit verkehrszustands-basierter Fahrtzeitmodellierung:**  
 Die Fahrtzeit wird nicht direkt gemessen, sondern aus lokalen Verkehrszustandsdaten (Verkehrsstärke, Geschwindigkeit, Dichte) abgeleitet. Der Verkehrszustand wird mit stationären Detektoren erfasst. Für die Abschätzung der Fahrtzeit zwischen den Detektoren werden Verkehrsflussmodelle oder Rekonstruktionsverfahren herangezogen.

- Fahrtzeitermittlung mit raumdiskreter Fahrtzeitmessung:**  
 Die Fahrtzeit wird zwischen zwei Messpunkten direkt durch einen Abgleich einer Kennung (Kennzeichen, Mobilfunk-ID, Bluetooth-Adresse) ermittelt. Die Kennung wird hierbei an den Messquerschnitten erfasst.

Verfahrensklasse	Datenquelle	Ergebnisse	Typischer Anteil der erfassten Fahrzeuge ①	Eigenschaften der Verfahrensklasse
Verkehrsnachfragebasierte Fahrtzeitmodellierung	Verkehrsstärken aus Messungen oder Verkehrsnachfragemodellen in Kombination mit Fahrtzeitermittlungsmodellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsstärken</li> <li>Fahrtzeiten je Strecke</li> <li>Fahrtzeiten für Routen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es werden keine Einzelfahrzeuge erfasst</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Fahrtzeiten werden nicht gemessen, sondern modelliert.</li> <li>Fahrtzeitverlängerungen aufgrund zufälliger Störungen können nicht ermittelt werden.</li> <li>Der Ort von regelmäßigen Störungen aufgrund hoher Auslastung kann abgeschätzt werden.</li> <li>Fahrtzeiten können für zukünftige Netz- und Nachfragezustände abgeschätzt werden.</li> <li>Verkehrsnachfragemodelle können Nachfrage-daten für die Gewichtung bereitstellen.</li> </ul>
Verkehrszustandsbasierte Fahrtzeitmodellierung	Lokale Verkehrszustände aus stationären Detektoren in Kombination mit Flussmodellen oder Rekonstruktionsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsstärke nach Fahrzeugklasse</li> <li>Fahrtzeiten zwischen MQ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bis zu 100 % der Fahrzeuge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In Verbindung mit Verkehrsflussmodellen oder Rekonstruktionsverfahren kann die Fahrtzeit zwischen benachbarten Messquerschnitten abgeschätzt werden.</li> <li>Der Ort einer Störung kann mit dem Verkehrsmodell abgeschätzt werden.</li> <li>Bei ausreichender Detektordichte kann die Verkehrsablaufqualität quantifiziert werden.</li> <li>Die gemessenen Verkehrsstärken können für die Gewichtung der Fahrtzeiten genutzt werden.</li> </ul>
Raumdiskrete Fahrtzeitmessung	Floating-Phone-Daten (FPD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrtzeiten zwischen MQ</li> <li>gewählte Routen</li> <li>Quellen und Ziele</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ca. 20 bis 30 % aller Fahrten, sofern eine Fahrtweite von 10 bis 20 km überschritten wird, SCHLAICH et al. (2011).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine direkte Fahrtzeitermittlung ist möglich.</li> <li>Die Lage der Messquerschnitte wird durch die Netzarchitektur des Mobilfunknetzes vorgegeben.</li> <li>Der Ort einer Störung zwischen zwei Messquerschnitten kann genau nicht erfasst werden.</li> </ul>
	Automatische Kennzeichenerfassung (ANPR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrtzeiten zwischen MQ</li> <li>gewählte Routen</li> <li>Durchgangsverkehr</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>70 % bis 80 % der Fahrzeuge, FRIEDRICH et al. (2009)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine direkte Fahrtzeitermittlung ist möglich.</li> <li>Der Ort einer Störung zwischen zwei Messquerschnitten kann nicht erfasst werden.</li> <li>Die Verfahrensklasse benötigt straßenseitige Detektoren und eignet sich daher nicht für Teilstrecken.</li> </ul>
	Bluetooth	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrtzeiten zwischen MQ</li> <li>gewählte Routen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bis zu 35 % der Fahrzeuge, MARGREITER et al. (2015)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine direkte Fahrtzeitermittlung ist möglich.</li> <li>Der Ort einer Störung zwischen zwei Messquerschnitten kann nicht erfasst werden.</li> <li>Die Verfahrensklasse benötigt straßenseitige Detektoren und eignet sich daher nicht für Teilstrecken.</li> </ul>
	Fahrzeugsignaturen aus stationären Detektoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrtzeiten für MQ mit kurzen Abständen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Etwa 10 % der Fahrzeuge, MAIER und ROTH (2008)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine direkte Fahrtzeitermittlung ist für kurze Strecken über die Fahrzeugsignaturen möglich.</li> </ul>
Raumkontinuierliche Fahrtzeitmessung	Floating-Car-Daten (FCD) ② für Einzelfahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrtzeiten zwischen beliebigen Punkten</li> <li>Orte von Störungen</li> <li>gewählte Routen (bei ausreichender Erfassungsrate)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Je nach Ausstattungsgrad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine direkte Fahrtzeitermittlung ist möglich, wenn die Zahl der erfassten Fahrzeuge groß genug ist.</li> <li>Der Ort einer Störung kann genau erfasst werden.</li> <li>Fahrtzeiten von abbiegenden Fahrzeugen.</li> </ul>
	Floating-Car-Daten (FCD) ② aufbereitet als Streckendaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrtzeiten zwischen beliebigen Punkten</li> <li>Orte von Störungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Je nach Ausstattungsgrad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eine direkte Fahrtzeitermittlung ist möglich, wenn die Zahl der erfassten Fahrzeuge groß genug ist.</li> <li>Der Ort einer Störung kann genau erfasst werden.</li> </ul>
① Bei den Verfahren mit einer raumdiskreten Fahrtzeitermittlung beziehen sich die Detektionsraten auf die Zahl der Fahrzeuge, die an beiden Messquerschnitten wiedererkannt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich zwischen den Messquerschnitten keine Ausfahrt befindet. Bei den ANPR-Systemen wird von einer Erfassung aller Fahrstreifen ausgegangen.				
② Die Klasse der FCD umfasst auch Daten, die mit Geräten erfasst wurden, die nicht fest in einem Fahrzeug eingebaut sind (Smartphones, nicht fest eingebaute Navis)				

Tab. 2-6: Verfahren der Fahrtzeitermittlung (abgeleitet aus FRIEDRICH et al. (2015))

Verfahrensklasse	Datenquelle	Eignung für Fahrzeitermittlung				Qualität für die Ermittlung von			Prognosefähigkeit		
		Teilstrecken	Strecken	Netzabschnitte	Relationen	mittleren Fahrzeiten	Fahrzeitverteilungen	Fahrzeiten für Abbieger	Kurzfristprognose	Mittelfristprognose	Maßnahmenprognose
Verkehrsnachfragebasierte Fahrzeitmodellierung	Verkehrsstärken aus Messungen oder Verkehrsnachfragemodellen in Kombination mit Fahrzeitermittlungsmodellen	-	+	+	+	o	-/o	-/o	-	o	+
Verkehrszustandsbasierte Fahrzeitmodellierung	Lokale Verkehrszustände aus stationären Detektoren in Kombination mit Flussmodellen oder Rekonstruktionsverfahren	+	+	+	-	o/+	o/+	-	+	+	o
Raumdiskrete Fahrzeitmessung	Floating-Phone-Daten (FPD)	-	o	+	+	+	+	+	o	+	-
	Automatische Kennzeichenerfassung (ANPR)	-	+	+	-	++	++	+	o	+	-
	Bluetooth	-	+	+	-	+	+	+	o	+	-
	Fahrzeugsignaturen aus stationären Detektoren	+	o	-	-	o	o	-	-	-	-
Raumkontinuierliche Fahrzeitmessung	Floating-Car-Daten (FCD) für Einzelfahrzeuge	+	+	+	o	++	++	++	o	+	-
	Floating-Car-Daten (FCD) aufbereitet als Streckendaten	+	+	+	o	++	o	-	o	+	-

Tab. 2-7: Bewertung der Verfahren der Fahrzeitermittlung für die Ermittlung von Fahrzeiten und Fahrzeitverteilungen auf Teilstrecken, Strecken, Netzabschnitten und Relationen im Autobahnnetz

- Fahrzeitermittlung mit raumkontinuierlicher Fahrzeitmessung:

Der Fahrtverlauf wird mithilfe von GNSS (Global Navigation Satellite System) kontinuierlich erfasst, sodass die Fahrzeit prinzipiell für jeden beliebigen Abschnitt angegeben werden kann.

Tabelle 2-6 gibt eine Übersicht über die Eigenschaften der vier Verfahrensklassen für die Fahrzeitermittlung. Aufbauend auf diesen Eigenschaften erfolgt eine Bewertung der Verfahrensklassen für die Ermittlung von Fahrzeiten und Fahrzeitverteilungen auf Teilstrecken, Strecken, Netzabschnitten und Relationen.

### 2.3.1 Fahrzeitermittlung mit verkehrsnachfragebasierter Fahrzeitmodellierung

Verkehrsmodelle werden in der Verkehrsplanung eingesetzt, um die Wirkungen von Entwicklungen und geplanten Maßnahmen auf die Qualität des Verkehrsablaufs zu ermitteln. Dazu müssen Verkehrsmodelle den Zusammenhang zwischen Verkehrsnachfrage, Verkehrsangebot und Fahrzeit

nachbilden. Die Verkehrsnachfrage kann zu diesem Zweck aus Messungen oder mit Modellen bestimmt werden:

- Verkehrsnachfrage aus der Ganglinie gemessener Verkehrsstärken:  
Die Ganglinie der Verkehrsstärke kann je nach Anwendungsfall eine Hauptverkehrszeit, einen ganzen Tag oder ein ganzes Jahr umfassen. Für die Ermittlung der Nachfrageganglinien gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Beispielhaft seien drei Ansätze genannt: Um Verkehrsstärken für jede Stunde eines Jahres zu ermitteln, kombinieren BRILON und ZURLINDEN (2003) typisierte Tagesganglinien mit einer Wochen- und einer Jahresganglinie. Dieser Ansatz wird von BRILON und GEISTEFELDT (2007) so erweitert, dass gemessene Tageswerte der Verkehrsstärke mit tagesindividuellen Typganglinien verknüpft werden. Ein weiterer ganglinienbasierter Ansatz wird im Entwurf der Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (RWS (20XX)) vorgestellt. Dort erfolgt die Herleitung der für die Bewertung erforderlichen 8.760 Einzelstundenwerte der Verkehrsstärke in

einem mehrstufigen Verfahren getrennt nach Leicht- und Schwerverkehr Straßen.

- Verkehrsnachfrage aus Verkehrsnachfragemodellen (z. B. LOHSE (2011)):

Bei Verkehrsnachfragemodellen ist die Verkehrsnachfrage das Ergebnis einer Nachbildung der Entscheidungsprozesse, die zur Verkehrsnachfrage führen. Diese Entscheidungen umfassen im Personenverkehr die Aktivitätenwahl, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl, Abfahrtszeitwahl und Routenwahl. Im Güterverkehr ermitteln die Modelle das Frachtaufkommen und bilden die Transportlogistikprozesse der Tourenplanung nach. Ergebnis der Routenwahl sind Fahrzeugzuflüsse in das Netz, aus denen sich die Verkehrsstärke der Einzelanlagen ergibt.

Die Fahrtzeit ergibt sich dann aus den Fahrzeugzuflüssen und dem Verkehrsangebot mit einem Fahrtzeitermittlungsmodell. Bild 2-5 zeigt wesentliche Klassen von Fahrtzeitermittlungsmodellen im Individualverkehr. Im Gegensatz zu Methoden der Fahrtzeitermittlung, die auf gemessenen Werten beruhen, können mit Verkehrsmodellen die Fahrtzeiten auch für zukünftige Netz- und Nachfragezustände abgeschätzt werden.

### Auslastungsabhängige Fahrtzeitermittlungsmodelle

Die einfachste Variante eines Fahrtzeitermittlungsmodells kann man als kapazitäts- oder auslastungsabhängiges Modell bezeichnen. Bei freiem Verkehrsfluss ergibt sich die Fahrtzeit für eine Strecke aus der Streckenlänge und der Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss. Für Abbiegebeziehungen an einem Knotenpunkt wird die auslastungsunabhängige Abbiegezeit 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 aus einer sogenannten CR-Funktion (capacity restraint), die den Zusammenhang zwischen Auslastung und Fahrtzeit abbildet. Die Auslastung einer Verkehrsanlage ist dabei als der Quotient von Verkehrsstärke  $q$  und Kapazität  $q^{max}$  definiert. Bei Strecken wird die Fahrtzeit bei freiem Verkehrsfluss mit einem auslastungsabhängigen Faktor erhöht. Bei Abbiegevorgängen an Knoten wird die Grundwartezeit um einen absoluten Wert erhöht, da die auslastungsunabhängige Wartezeit an einem Knoten nicht von der Grundwartezeit abhängt. Die CR-Funktion entspricht dann ei-

nem Warteschlangenmodell, bei dem nach Erreichen der Kapazität jedes zusätzliche Fahrzeug die Fahrtzeit erhöht. Ein kapazitätsabhängiges Fahrtzeitermittlungsmodell betrachtet die Strecken und Knoten des Netzes unabhängig von ihren Nachbarstrecken. Ein kapazitätsabhängiges Modell stellt deshalb kein Verkehrsflussmodell dar, sondern bietet eine grobe, aber einfache Methode zur Ermittlung von Fahrtzeiten. Wesentliche Inputdaten eines kapazitätsabhängigen Modells sind

- die Verkehrsstärke,
- die Kapazität und
- die Form der CR-Funktion.

Auslastungsabhängige Fahrtzeitermittlungsmodelle kommen in Verkehrsnachfragemodellen für die Umlegung im Straßenverkehr zum Einsatz. Im HBS (2015) werden auslastungsabhängige Fahrtzeitermittlungsmodelle für die Bemessung von Autobahnstrecken genutzt.

### Makroskopische Verkehrsflussmodelle

Makroskopische Flussmodelle berücksichtigen im Gegensatz zu auslastungsabhängigen Modellen die Interaktion benachbarter Strecken. Dabei wird das Straßennetz in Abschnitte unterteilt, deren Geschwindigkeit aus der Verkehrsdichte abgeleitet wird. Die Formulierung eines makroskopischen Flussmodells umfasst drei Gleichungen: (1) Die Zustandsgleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke  $q$ , Dichte  $k$  und Geschwindigkeit  $v$ . Ihre grafische Repräsentation wird als Fundamentaldiagramm bezeichnet. (2) Die Kontinuitätsgleichung stellt sicher, dass die Differenz der Fahrzeuge, die in einen Abschnitt ein und ausfahren, zu einer entsprechenden Dichteänderung im Abschnitt führt. (3) Die Bewegungsgleichung definiert die Beschleunigungsprozesse an einem Ort und einen eventuellen Anpassungsterm, zur Anpassung der Geschwindigkeit an die Gleichgewichtsgeschwindigkeit  $v(k)$ . Aufgrund der Kopplung der drei Gleichungen sind makroskopische Flussmodelle in der Lage, Stoßwellen und Rückstauereffekte abzubilden. Wesentliche Inputdaten eines makroskopischen Flussmodells sind

- die Verkehrsstärke bzw. der Zufluss in eine Strecke,
- die Form des Fundamentaldiagramms (bzw. der Verkehrsstärke-Geschwindigkeitsrelation) und
- die Form der Bewegungsgleichung.

Kapazitätsdaten gehen über das Fundamentaldiagramm ein. Eine häufige Ausprägung eines makroskopischen Flussmodells ist das sogenannte Cell-Transmission-Modell (CTM) von DAGANZO (1994). Es unterteilt das Netz in Zellen und nutzt eine vereinfachte trapezförmige Form des Fundamentaldiagramms.

Beispiele für makroskopische Modelle zur Ermittlung von Fahrtzeiten und Verlustzeiten auf Autobahnen sind das amerikanische Programm FREEVAL (ROUPHAIL et al. (2011)) und das deutsche Programm KAPASIM. Das Verfahren KAPASIM ermittelt in der ersten Version von ZURLINDEN (2003) staubedingte Zeitverluste nach einem Zusammenbruch des fließenden Verkehrs. Zeitverluste aufgrund einer höheren Fahrtzeit bei zunehmender Verkehrsstärke im fließenden Verkehr werden nicht berücksichtigt. Damit entspricht es einem Warteschlangenmodell. GEISTEFELDT (2005) erweitert das Verfahren so, dass auch Zeitverluste im fließenden Verkehr berücksichtigt werden. Dazu nutzt er ein Verkehrsflussmodell, das sich am Cell-Transmission-Modell orientiert.

### Mikroskopische Verkehrsflussmodelle

Die detaillierteste Modellierung ermöglichen mikroskopische Flussmodelle. Sie modellieren die Interaktion zwischen Einzelfahrzeugen. In dieser Modellklasse gibt es eine Vielzahl von Modellen. Sie reichen von relativ einfachen Modellen wie z. B. sogenannten zellulären Automaten, bis hin zu psychophysischen Fahrzeugfolgmodellen, die das Fahrerverhalten sehr differenziert abbilden. Wesentliche Inputdaten eines mikroskopischen Flussmodells sind

- die Verkehrsstärke und
- Parameter des Fahrzeugfolge- und des Fahrstreifenwechselverhaltens.

In einem mikroskopischen Flussmodell sind Kapazitätsdaten keine Inputdaten. Die Kapazität ergibt sich stattdessen aus den Verhaltensparametern. Die Parameter müssen so kalibriert werden, dass die beobachtete Kapazität mit der modellierten Kapazität übereinstimmt. Mikroskopische Verkehrsflussmodelle werden im HBS (2015) als alternative Verfahren empfohlen, wenn Fahrtzeiten für Teilstrecken mit einer Qualitätsstufe F ermittelt werden sollen. GEISTEFELDT et al. (2017) zeigen, wie mikroskopische Verkehrsflussmodelle für die Fahrzeitermittlung auf Autobahnen genutzt werden können.

### Makroskopische Warteschlangenmodelle

Makroskopische Warteschlangenmodelle sind eine Form makroskopischer Modelle, die Warteprozesse im Verkehrsablauf (Stauungen bei Engpässen, Knotenpunkte mit und ohne Lichtsignalanlagen) abbilden. Zur Analyse und Beschreibung dieser Prozesse werden Modelle der Warteschlangentheorie angewandt, die drei wesentliche Komponenten umfassen:

- Ankunftsprozess,
- Bedienungsprozess und
- Bedienungsregel.

Diese Ausprägungen der Komponenten definieren die Art des Wartemodells. Im HBS (2015) kommen Warteschlangenmodelle für die Ermittlung der Wartezeiten an plangleichen Knotenpunkten zum Einsatz.

### Mesoskopische Warteschlangenmodelle

Mesoskopische Flussmodelle stellen eine Mischform zwischen den makroskopischen und mikroskopischen Flussmodellen dar. Sie betrachten zwar einzelne Fahrzeuge, die sich aber in Ihren Eigenschaften innerhalb eines Straßenabschnitts nicht unterscheiden, d. h. die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ergibt sich aus den makroskopischen Randbedingungen des Straßenabschnitts.

### Vor- und Nachteile der Methode

Eine Fahrzeitermittlung mit einer verkehrsnachfragebasierten Fahrzeitmodellierung hat folgende Vor- und Nachteile:

1. Vorteile
  - Es können Fahrtzeiten für den Analysezustand und den Prognosezustand bestimmt werden.
  - Die Fahrtzeiten können für Teilstrecken, Strecken und Netzabschnitte bestimmt werden
  - Die Ergebnisse sind reproduzierbar.
2. Nachteile
  - Die Fahrtzeit entsprechen nicht den tatsächlich gemessenen Fahrtzeiten. Die Größe der Abweichung kann nur durch Messungen quantifiziert werden.
  - Zufällige Störungen werden nicht oder nur über Annahmen berücksichtigt.

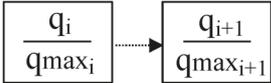
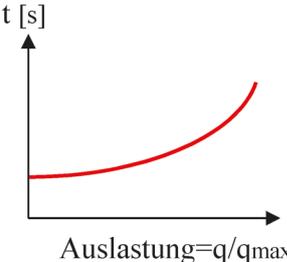
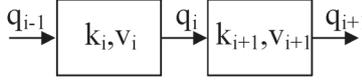
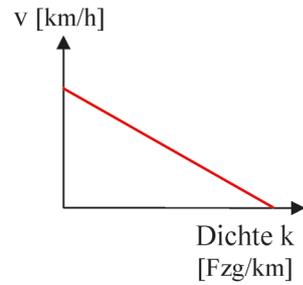
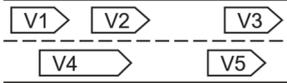
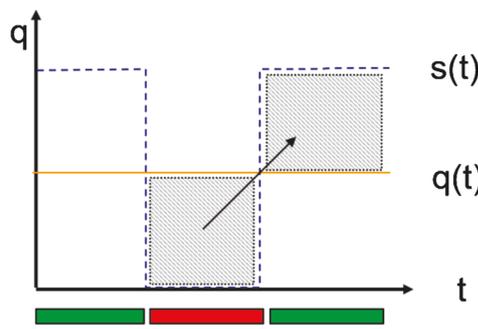
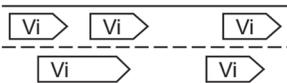
Auslastungsabhängiges Modell	Makroskopisches Flussmodell	Mikroskopisches Flussmodell
<p>Strecke i    Strecke i+1</p>  <p>t [s]</p>  <p>Auslastung=<math>q/q_{max}</math></p>	<p>Strecke i    Strecke i+1</p>  <p>v [km/h]</p>  <p>Dichte k [Fzg/km]</p>	<p>Strecke i</p> 
<p>Input</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsstärke</li> <li>• Kapazität</li> <li>• Form der CR-Funktion (Capacity Restraint Funktion)</li> </ul>	<p>Input</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsstärke</li> <li>• Form des Fundamentaldiagramms oder der Verkehrsstärke-Geschwindigkeitsrelation</li> </ul>	<p>Input</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsstärke</li> <li>• Verhaltensparameter für Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechsel</li> </ul>
<p>Output</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• eine deterministische Fahrtzeit abgeleitet aus der Fahrtzeit im unbelasteten Netz und der Auslastung</li> </ul> $t = t^0 \cdot \left( 1 + \beta_1 \left( \frac{q}{q_{max}} \right)^{\beta_2} \right)$	<p>Output</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• eine deterministische Fahrtzeit abgeleitet aus der Dichte und der Streckenlänge</li> </ul> $q = v \cdot k$ $v = \frac{q}{k}$ $t = \frac{l}{v}$	<p>Output</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• eine mittlere Fahrtzeit abgeleitet aus den Einzelfahrtzeiten der Fahrzeuge n</li> <li>• Fahrtzeitverteilungen</li> </ul> $t_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N t_{i,n}$
Makroskopisches Warteschlangenmodell		Mesoskopisches Flussmodell
		<p>Strecke i</p>  <p>Einzelfahrzeuge aus einem mikroskopischen Flussmodell mit einheitlicher Streckengeschwindigkeit aus einem makroskopischen Flussmodell</p>
<p>Input</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zuflussrate q</li> <li>• Abflussrate s</li> <li>• Verteilung Zu- und Abfluss</li> </ul>		<p>Input</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsstärke</li> <li>• Form des Fundamentaldiagramms oder der Verkehrsstärke-Geschwindigkeitsrelation</li> </ul>
<p>Output</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• eine mittlere Wartezeit <math>d_u</math> eine Wartezeitverteilung abgeleitet aus der Zu- und Abflussverteilung</li> </ul>		<p>Output</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• eine deterministische Fahrtzeit abgeleitet aus der Dichte und der Streckenlänge</li> </ul>

Bild 2-5: Klassen von Fahrtzeitermittlungsmodellen im Individualverkehr

### 2.3.2 Fahrtzeitermittlung mit verkehrszustandsbasierter Fahrtzeitmodellierung

Bei diesem Ansatz wird die Fahrtzeit zwischen zwei stationären Messstellen aus dem lokalen Verkehrszustand an den Messstellen abgeleitet. Im einfachsten Fall wird als Verkehrszustand die lokale Geschwindigkeit an den beiden Messstellen herangezogen. Die Fahrtzeit zwischen den Messstellen berechnet sich dann aus dem Mittelwert der an den Messstellen erfassten Geschwindigkeiten und aus der Entfernung zwischen den Messstellen. Im Fall von Störungen erhält man bessere Ergebnisse durch die Kopplung der lokalen Messwerte mit einem makroskopischen oder mikroskopischen Verkehrsflussmodell. Dabei können zwei Verfahrenstypen unterschieden werden:

- **Rekonstruktionsverfahren:**  
Diese Verfahren rekonstruieren den Verkehrszustand entlang eines Streckenzugs mit einem Algorithmus, der die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke, Dichte und Geschwindigkeit abbildet.
- **Simulationsverfahren:**  
Diese Verfahren nutzen makroskopische oder mikroskopische Verkehrsflussmodelle, die den realen Verkehrszustand eines Streckenzugs oder eines Teilnetzes kontinuierlich parallel zur Realität abbilden sollen.

Beispiele für Rekonstruktionsverfahren sind ASDA-FOTO und das verkehradaptive Rekonstruktionsverfahren von Kesting und Treiber, die beide für den Einsatz auf Autobahnen konzipiert sind:

- Das System ASDA-FOTO (KERNER et al. (2000) und REHBORN et al. (2003)) ist ein von der Daimler-Forschung entwickeltes und patentiertes Verfahren, das sich für die Zustandserfassung auf Autobahnen eignet. ASDA-FOTO steht für Automatische Staudynamikanalyse – Forecasting of Traffic Objects). Ziel des Verfahrens zur Stauverfolgung ASDA ist die zeitkontinuierliche Verfolgung und Vorhersage einer detektierten, sich bewegenden, langen Stauzone zwischen lokalen Messstellen, auch wenn der Stau zwischen den Messstellen nicht direkt gemessen werden kann. Das Verfahren FOTO ergänzt das Verfahren ASDA um die räumlich-zeitlichen Prognosen des sogenannten synchronisierten Verkehrs. Aus ASDA-FOTO können Fahrtzeiten abgeleitet werden. ASDA-FOTO eignet sich für

den Einsatz auf autobahnähnlichen Straßen mit planfreien Knotenpunkten und erfordert Detektorabstände von ca. 2 bis 3 km.

- Das verkehradaptive Rekonstruktionsverfahren (KESTING und TREIBER (2010)) nutzt für die Rekonstruktion des Verkehrszustands als Eingangsgrößen Geschwindigkeitswerte, die zu festen Zeiten an definierten Orten gemessen werden. Als Output erhält man eine kontinuierliche Geschwindigkeitsschätzung als Funktion von Ort und Zeit. Um diese wesentlichen Eigenschaften der Verkehrsdynamik zu berücksichtigen, werden zwei geglättete Geschwindigkeitsfelder mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten für freien Verkehr (Annahme 70 km/h) und gestauten Verkehr (Annahme 15 km/h) unterschieden. Im Gegensatz zu ASDA-FOTO ist das Rekonstruktionsverfahren nicht für Real-Time-Anwendungen konzipiert, sondern für die Darstellung historischer Verkehrslagen.

Ein Beispiel für ein Simulationsverfahren ist das Verfahren OLSIM (Online Simulation), das auf einer Verkehrsflusssimulation mit sogenannten zellulären Automaten basiert. Das an der Universität Duisburg-Essen entwickelte Verfahren (SCHRECKENBERG et al. (2005)) wurde im Autobahnnetz in Nordrhein-Westfalen für die Ermittlung der Verkehrslage genutzt. Aus den Simulationen ergeben sich die mittlere Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit auf den modellierten Straßenstrecken. Die Simulation erfüllt zwei wesentliche Aufgaben: Einerseits interpoliert sie die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit zwischen den einzelnen Messstellen, um auch in den nicht durch stationäre Detektoren abgedeckten Straßen Daten zu erhalten. Andererseits ermöglicht die Simulation eine Kurzfristprognose der Verkehrsstärken und der Fahrtzeiten. Das Verfahren PTV OPTIMA (OTTERSTÄTTER et al. (2013)) ist ein weiteres Beispiel für ein Simulationsverfahren, das ein makroskopisches Flussmodell nutzt.

Eine Fahrtzeitermittlung mit einer verkehrszustandsbasierten Fahrtzeitmodellierung zeichnet sich durch folgende Vor- und Nachteile aus:

1. Vorteile
  - Der Ort einer Störung kann mit dem Verkehrsmodell abgeschätzt werden.
  - Es treten keine datenschutzrechtlichen Probleme auf.

2. Nachteile

- Die Güte der Fahrzeitdaten hängt stark von der Qualität des Modells, von den Abständen der lokalen Detektoren und von der Qualität der Datenerfassung ab.
- Es können in der Regel keine Fahrzeiten für komplette Routen, sondern nur für Teilrouten auf detektierten Straßennetzen (Autobahn) ermittelt werden.

2.3.3 Fahrzeitermittlung mit raumdiskreter Fahrzeitmessung

Die Methoden der raumdiskreten Fahrzeitermittlung basieren auf der Wiedererkennung von Verkehrsteilnehmenden an verschiedenen Orten.

Die Berechnungen der Fahrzeiten über raumdiskrete Fahrzeugwiedererkennung können lediglich mittlere Geschwindigkeiten ermitteln. Diese mittlere Geschwindigkeit wird durch die lineare Verbindung zwischen den Erfassungszeitpunkten ausgedrückt, während bei realen Fahrtverläufen Geschwindigkeitsunterschiede auftreten können. Dadurch können keine direkten Aussagen zum räumlichen und zeitlichen Verlauf oder zu eventuell auftretenden Störungen gemacht werden. Aussagen hierzu können nur indirekt durch den Vergleich von Einzelmesswerten oder zeitlich aggregierten Werten gemacht werden. In Bild 2-6 ist der zeitlich-räumliche Verlauf von Einzelfahrzeugen zu sehen. Die gestrichelten Linien stellen die mittleren Geschwindigkeiten der detektierten Fahrzeuge dar. Diese Linien sind die lineare Verbindung zwischen den beiden Erfassungszeitpunkten. Die durchgezogenen Li-

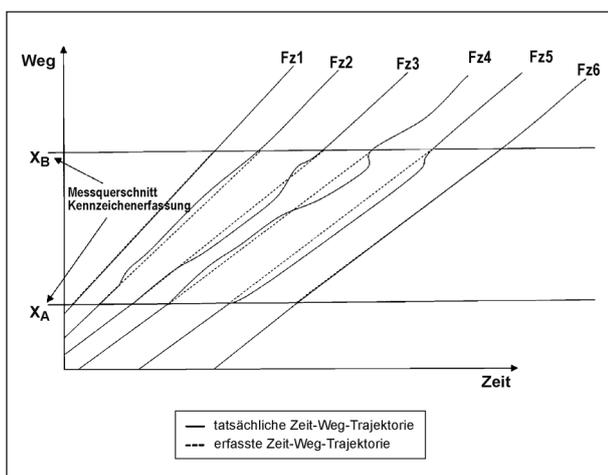


Bild 2-6: Zeitlich-räumliche Betrachtung von Einzelfahrzeugen (eigene Abbildung)

nien stellen den realen Fahrtzeitverlauf zwischen den Messquerschnitten dar. (SPANGLER (2009))

2.3.3.1 Floating-Phone-Daten (FPD)

Mobilfunknetze in Deutschland verwenden die Frequenzbereiche der GSM-, UMTS- und der LTE-Standards. Sie stellen die Basisinfrastruktur für die mobile Kommunikation dar. Die Netze der Mobilfunkbetreiber ermöglichen „nahezu“ lückenlose Kommunikation in Deutschland. Ein Mobilfunknetz besteht aus einer Menge an benachbarten Gebieten, den Funkzellen. Diese Funkzellen besitzen Durchmesser von unter 100 Metern bis zu mehreren Kilometern. Der Durchmesser ist abhängig von der Region und der Anzahl der Personen im Gebiet. Jede Funkzelle wird über eine sogenannte Basisstation angeschlossen. Nach Bild 2-7 kann eine Basisstation bis zu drei Sektoren versorgen. (STEINHART (2015))

Inaktive Mobilfunkgeräte, die momentan nicht genutzt werden, lösen nur bei einem Wechsel der Location Area aus. Somit ist der Standort inaktiver Mobilfunkgeräte (Standby) nur auf der Ebene von Location Areas bekannt. Eine Location Area besteht aus einer Anzahl an Funkzellen. Der Wechsel der Location Area wird auch als „Handover“ bezeichnet. Lediglich bei einem aktiven Verbindungsaufbau wird die momentane Funkzelle übermittelt. Ein aktiver Verbindungsaufbau ist z. B. ein eingehender Anruf oder ein Datentransfer. Aus den Standby-Daten, die durch die Wechsel der Location Areas entstehen, lassen sich Fahrzeiten im Verkehrsnetz ermitteln. Durch den zeitlichen Verlauf der besuchten Location Areas lassen sich Fahrzeiten und Fahrtrouten ableiten. Hierbei werden Rückschlüsse auf zurückgelegte Fahrten und plausible Routen gezo-

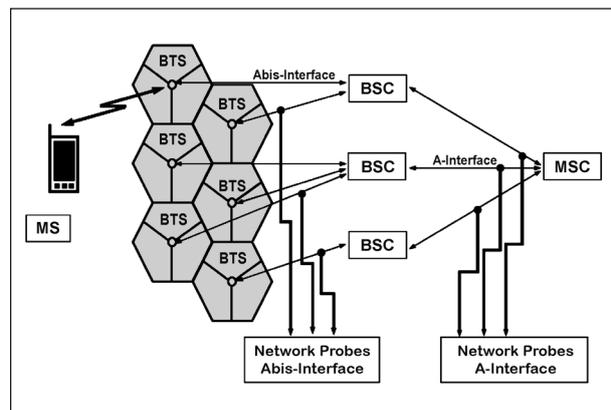


Bild 2-7: Zellularer Aufbau eines Mobilfunknetzes (Quelle: Do-iT (2008. Bild 1))

gen, um mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit den zeitlichen Verlauf der getätigten Ortsveränderung zu identifizieren (SCHLAICH et al. (2011)). Bild 2-8 zeigt ein Beispiel für Fahrtzeiten aus FPD.

Die Vor- und Nachteile der Datenquelle Floating-Phone-Daten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

#### 1. Vorteile

- In Deutschland liegt eine hohe Verbreitung von Mobilfunkgeräten vor. Dadurch wird eine hohe Quantität der Daten erreicht.
- Es müssen keine gesonderten Daten erhoben oder ermittelt werden. Die Mobilfunkdaten fallen im normalen Betrieb der Mobilfunkgeräte und der Mobilfunknetze an.

#### 2. Nachteile

- Die Daten sind derzeit noch nicht allgemein verfügbar.

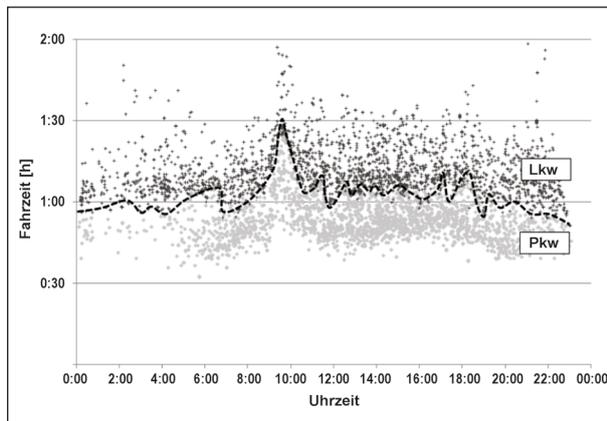


Bild 2-8: Fahrtzeiten zwischen Stuttgart und Walldorf (über Karlsruhe) und Aufteilung in die Fahrzeugklassen Pkw und Lkw (SCHLAICH et al. (2011))

- Fahrtzeitmessungen sind nur für Netzabschnitte möglich, die einen ausreichenden Anteil an Durchgangsfahrten aufweisen.
- Ergebnisse aus 2011 gehen davon aus, dass Fahrtzeiten nur aus längeren Ortsveränderungen von mindestens ca. 20 km abgeleitet werden können. Bei einer hohen Funknetzdicke sind auch Auswertungen für geringere Längen möglich. (SCHLAICH et al. (2011)). In dichten Stadtnetzen lassen sich Fahrtzeiten deshalb nur für übergeordnete Straßen (etwa ab Verbindungsfunktionsstufe III) abschätzen. Seit 2011 hat die Zahl der Messdaten pro SIM-Karte allerdings zugenommen, sodass zukünftig Fahrtzeitdaten möglicherweise auch für das gesamte Straßennetz erfasst werden können.
- Das Auftreten eines Störfalls lässt sich durch eine erhöhte Fahrtzeit erkennen. Die Lage der Störung ist mit diesem Verfahren nur eingeschränkt lokalisierbar und hängt von der Gestaltung des Mobilfunknetzes ab.

#### 2.3.3.2 Kennzeichenerfassung (ANPR)

ANPR-Systeme (Automated Number Plate Recognition) zur automatischen Erfassung von Kfz-Kennzeichen bestehen im Wesentlichen aus zwei Komponenten: einer Kamera, die Kennzeichen vorbeifahrender Fahrzeuge erfasst und ununterbrochen Bilder an einen Rechner sendet und einer Software, die in den empfangenen Bildern die einzelnen Zeichen der Kennzeichen erkennt, verschlüsselt und in einer Datenbank abspeichert. Je nach Aufstellungsart des ANPR kann das System einen oder mehrere Fahrstreifen beobachten und erfassen. Bild 2-9 verdeutlicht den Ablauf der Kennzeichenerkennung.

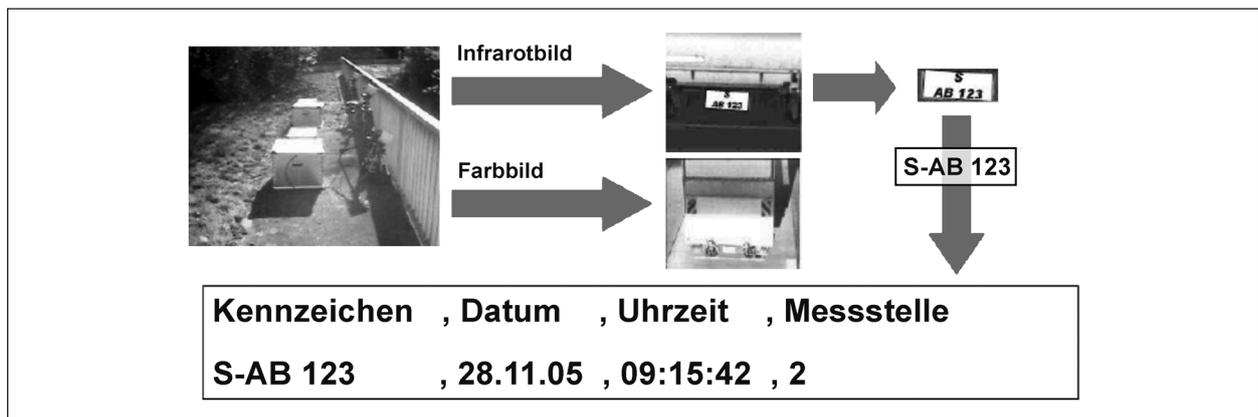


Bild 2-9: Schematischer Ablauf einer Kennzeichenerkennung (FRIEDRICH et al. (2009))

Nach FRIEDRICH et al. (2009) kann ein ANPR-System mindestens 80 % der Kennzeichen von vorbeifahrenden Fahrzeugen richtig erkennen und interpretieren. Voraussetzung hierfür ist, dass das System richtig aufgebaut und gut eingestellt ist. Die Erkennung hängt nicht nur von der Aufstellposition und der richtigen Einstellung des Systems ab, sondern auch von weiteren Einflüssen, wie: Niederschlag, Sonneneinstrahlung, Abschattungen auf der Fahrbahn oder Verschmutzungsgrad der Kennzeichen. Mit dieser Methode ist es möglich, Fahrzeuge auf Autobahnen oder Fahrzeuge bei hohen Verkehrsstärken zu detektieren. Eine Fahrtzeitermittlung mit ANPR hat folgende Vor- und Nachteile:

#### 1. Vorteile

- Hohe Erkennungsrate
- Hoher Stichprobenumfang
- Ermittlung sehr genauer Fahrtzeitdaten mit hoher Güte

#### 2. Nachteile

- Hohe Investitionskosten
- Die Erfassung von Kennzeichen wird auch bei einer Verschlüsselung der Kennzeichen von den Datenschützern der Bundesländer unterschiedlich beurteilt und ist nicht in jedem Bundesland möglich.
- Der Ort einer Störung zwischen zwei Messquerschnitten kann nicht erfasst werden.
- Der zeitliche Verlauf zwischen zwei Messquerschnitten kann nicht erfasst werden.
- Es können in der Regel keine Fahrtzeiten für komplette Routen, sondern nur für Teilrouten auf detektierten Straßennetzen (Autobahn) ermittelt werden.

#### 2.3.3.3 Bluetooth

Bluetooth dient der Funkvernetzung von mobilen Geräten über kurze Distanz. Will ein mobiles Gerät mit anderen Geräten in Kontakt treten, sendet es vor Aufbau der Datenverbindung fortlaufend seine eindeutige MAC-Adresse. Ein Beispiel für mobile Geräte im Pkw sind Mobilfunkgeräte mit einer Freisprecheinrichtung. Über die MAC-Adresse können – ähnlich wie bei ANPR-Systemen – Fahrzeuge an unterschiedlichen Stellen im Netz wiedererkannt werden. In MARGREITER et al. (2015) werden De-

tektionsraten von rund 35 % für eine Autobahnstrecke von etwa 5 km ohne Ausfahrten angegeben. Bei der Fahrtzeitermittlung mittels Bluetooth ergeben sich folgende Vor- und Nachteile:

#### 1. Vorteile

- Deutlich preiswerter als ANPR.
- Für die Erfassung einer Kreuzung reichen ein bis zwei Geräte.
- Einfache Montierung (es genügt, die Geräte in einem vorhandenen Schaltkasten am Straßenrand unterzubringen).

#### 2. Nachteile

- Es werden nicht alle Fahrzeuge erfasst (Bluetooth muss aktiv und auf sichtbar gestellt sein).
- Fahrzeuge können mehrfach erfasst werden (mehrere Bluetooth-Geräte im Fahrzeug aktiv oder Doppeldetektion von langsam fahrenden Fahrzeugen).
- Keine exakte Lokalisierung der erfassten Fahrzeuge. Da die Erfassungsgeräte eine Reichweite von bis zu 100 m aufweisen, ist eine Lokalisierung im Bereich von bis zu 100 m möglich.

#### 2.3.4 Fahrtzeitermittlung mit raumkontinuierlicher Fahrtzeitmessung

Eine raumkontinuierliche Fahrtzeitermittlung erfordert eine Positionserfassung mit globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS). Vorhandene und geplante GNSS sind GPS, GALILEO, GLONASS und Beidou. GNSS-basierte Daten für die Fahrtzeitermittlung umfassen Floating-Car-Daten (FCD) und Floating-Smartphone-Daten (FSD):

- Als Floating-Car-Daten (FCD) werden die 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.
- Die Bezeichnung „Floating-Smartphone-Daten“ soll die positionsbezogenen Daten, die aufgrund unterschiedlichster Dienste und Anwendungen auf einem Smartphone erzeugt und an Anbieter übermittelt werden, umschreiben. Diese Anwendungen können zwar nicht auf fahrzeugseitig er-

fasste Daten (zurückgelegte Weglänge) zurückgreifen, die Positionsbestimmung kann aber im Gegensatz zu FCD durch GSM-Ortung und WLAN-Ortung verbessert werden.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden FCD und FSD einheitlich als FCD bezeichnet. FCD können im Rahmen eines Projekts mit projektbezogenen Messfahrten ermittelt oder aus kommerziellen Datenquellen übernommen werden.

### FCD aus Messfahrten

Eine einfache Methode zur Messung von Fahrtzeiten ist die Durchführung von Messfahrten mit einer Aufzeichnung der Fahrt. Hierfür werden Messfahrzeuge mit einem GPS-Empfänger und einem GPS-Logger (schreibt die Daten mit) ausgestattet. Das Fahrzeug fährt zuvor definierte Routen ab und zeichnet Fahrtzeit, Fahrtgeschwindigkeit, Wartezeit und die Anzahl der Halte auf. Auf diese Weise können exakte Trajektorien (zeitlich-örtlicher Verlauf einer Bewegung) gebildet werden.

#### 1. Vorteile

- Exakte Erfassung der Fahrtroute
- Hochaufgelöste zeitliche und räumliche Informationen über den Verkehrszustand
- Alle nötigen Kenngrößen können gemessen werden

#### 2. Nachteile

- In der Regel sehr geringer Stichprobenumfang
- Methode eignet sich nur für die Validierung von Fahrtzeiten und nicht für eine zeitlich kontinuierliche Fahrzeitermittlung.

### FCD aus kommerziellen Datenquellen

Tabelle 2-8 gibt eine Übersicht über kommerzielle Datenquellen für FCD und deren Dateninhalte, die in Kapitel 2.4. im Detail vorgestellt werden. Derzeit bieten in Deutschland vier Anbieter Fahrtzeitdaten an, die aus Navigationsgeräten oder Navi-Apps abgeleitet werden (Stand: Juli 2018).

Kommerzielle FCD-Datenquellen (HERE, INRIX, TomTom) oder lokale Geschwindigkeiten aus anderen Quellen sind für die Ermittlung von Fahrtzeiten und Fahrtzeitverteilungen für Strecken, Netzabschnitten und Relationen nur dann geeignet, wenn entweder

- Fahrtzeiten bereits in der gewünschten räumlichen (Netzabschnitt, Relation) und zeitlichen (Perzentile) Auflösung geliefert werden,

oder wenn

- die Mittelwerte der Geschwindigkeiten der Teilstrecken genutzt werden,
- die Geschwindigkeiten der Teilstrecken zeitlich aufgelöst verfügbar sind (15', besser 5' oder 3') und in einer Heatmap dargestellt werden können,
- aus diesen Daten für viele Abfahrtszeitpunkte (ca. alle 5') repräsentative Fahrtzeit-Trajektorien erstellt werden, die die mittlere Geschwindigkeit zum Durchfahrtszeitpunkt verwenden und
- aus diesen repräsentativen Fahrtzeit-Trajektorien dann Fahrtzeitverteilungen für Strecken und Netzabschnitte ermittelt werden.

Dazu müssen die Geschwindigkeitsdaten zeitlich und räumlich aufgelöst archiviert werden. Bild 2-10 zeigt eine Heatmap für einen Netzabschnitt und die

Datenquelle	Vzulässig	Verteilungsklassen	Mittelwert	Hits, Nachfrage	Bezugsobjekt für Fahrtzeit
Google	-	Optimistic Best-Guess Pessimistic	-	-	Relation (Route)
HERE	✓	Perzentile in 20 Klassen	✓	✓	Teilstrecke
INRIX	✓	Best-Guess (Speed optimized estimate)	-	-	Teilstrecke
TomTom	✓	Perzentile in 20 Klassen	✓	✓	Teilstrecke

Tab. 2-8: Übersicht über FCD-Datenquellen und Dateninhalte (Stand: Juli 2018)

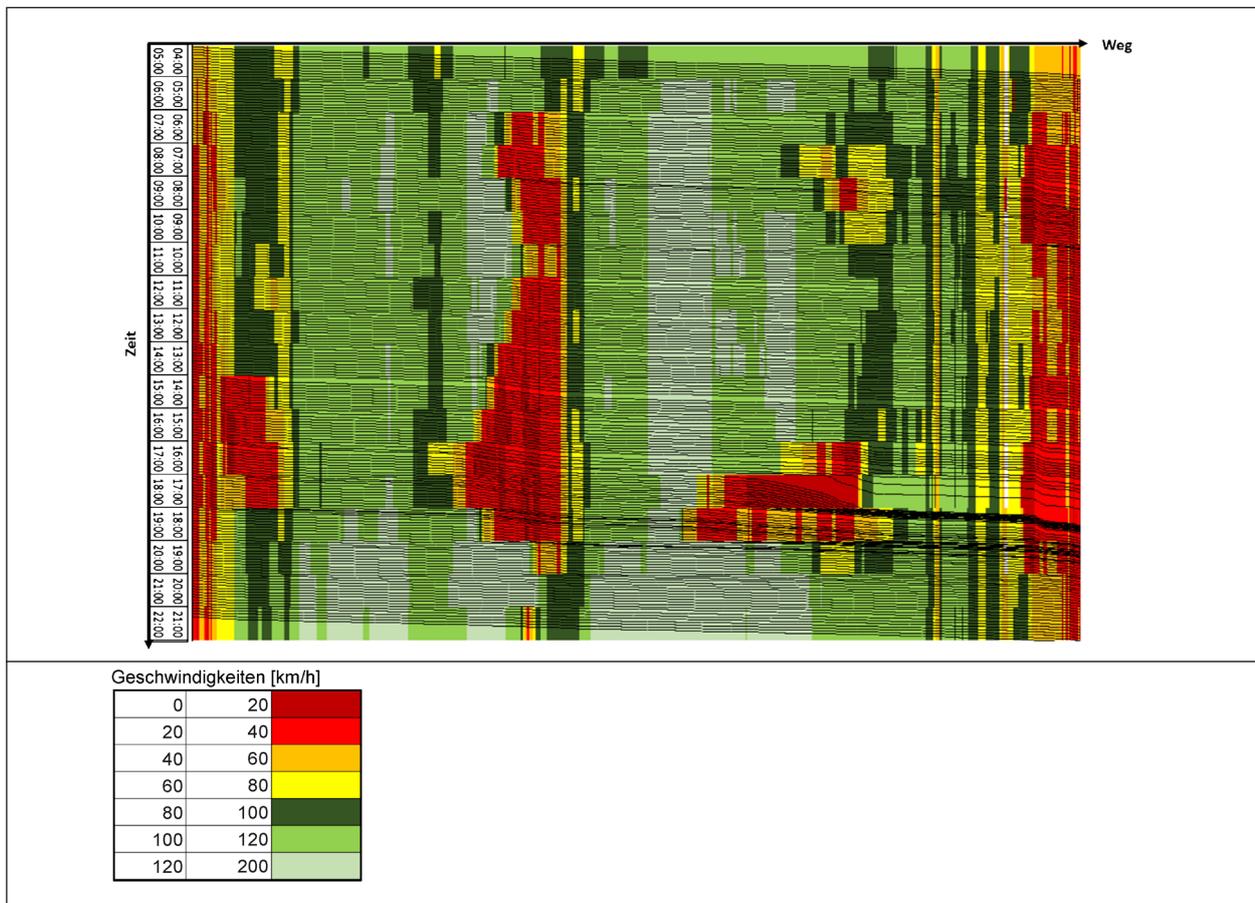


Bild 2-10: Repräsentative Zeit-Weg-Trajektorien in einer Heatmap, in der Geschwindigkeiten abhängig von Ort und Zeit eingetragen werden.

aus dieser Heatmap generierten Fahrtzeit-Trajektorien für 12 Abfahrtszeitpunkte je Stunde.

FCD für Teilstrecken aus kommerziellen Datenquellen haben folgende Vor- und Nachteile:

#### 1. Vorteile

- Es können mittlere Fahrtzeiten für komplette Routen mit einer hohen Qualität ermittelt werden.
- Störfallerkennung sowohl räumlich als auch zeitlich möglich.

#### 2. Nachteile

- Für die Ermittlung von Fahrtzeitverteilungen müssen die Geschwindigkeitsdaten zeitlich und räumlich aufgelöst archiviert werden und dann daraus repräsentative Fahrtzeit-Trajektorien generiert werden. Diese Trajektorien sind dann Input für die Fahrtzeitverteilungen.

### 2.3.5 Ermittlung von Reisezeiten

Da die Bewertung der Verbindungsqualität von Haustür zu Haustür erfolgen soll, muss die Bewertung des Zeitaufwandes die Zugangszeit (Gehzeit von der Haustür zum Einstiegsort in das Verkehrsmittel), die Abgangszeit (Gehzeit vom Ausstiegsort zur Haustür) und eine eventuelle Parksuchzeit berücksichtigen. Wenn die Ermittlung der Fahrtzeit mit einem Netzmodell erfolgt, dass nicht alle Straßen umfasst, muss zusätzlich die Fahrtzeit im untergeordneten Netz abgeschätzt werden. Aufbauend auf Untersuchungen von FRIEDRICH und GALSTER (2008) und GALSTER (2009) enthält die RIN Vorschläge für sog. Anbindungszeiten, die Zugangs-, Abgangs- und Parksuchzeiten umfassen. Die Zugangszeit und die Abgangszeit hängen von der Lage und der baulichen Struktur des Gebietes ab. Die Zu- und Abgangszeit steigt mit zunehmender Baudichte. In Gebieten mit hoher Baudichte kann oftmals nicht direkt am Ausgangs- bzw. Zielpunkt

Gebietscharakteristik	$t_{ZU}/t_{AB}$ [min]	$t_{PS}$ bei normalem Parkdruck [min]	$t_{PS}$ bei hohem Parkdruck [min]
Kernbereich Oberzentrum • vorrangige Nutzung Einkauf, Erledigung • kaum Wohnnutzungen	2,5	2,0	4,0
Kernbereich Mittelzentrum • Mischnutzung Einkauf, Erledigung, Arbeiten • geringe Wohnnutzungen	2,0	1,0	3,0
Kernbereich Unterzentrum • Mischnutzung Einkauf, Erledigung, Arbeiten • mittlere Wohnnutzungen	1,0	1,0	2,0
Innenstadtrandbereich Oberzentrum • Mischnutzung Wohnen, Arbeiten, Einkaufen, Erledigen • Bewohnerparken findet in größerem Umfang im Straßenraum statt.	2,0	2,0	4,0
• Sonstige Gebiete • vorrangige Wohnnutzung • Bewohnerparken findet vor allem auf privaten Stellplätzen und nur in geringem Umfang im Straßenraum statt.	1,0	0,0	-

Tab. 2-9: Zugangszeit, Abgangszeit und Parksuchzeit im Pkw-Verkehr nach RIN (2008, Tabelle 21)

geparkt werden, sodass größere Entfernungen zu Fuß zurückgelegt werden müssen. In Tabelle 2-9 sind die Zu- und Abgangszeiten in Abhängigkeit der Gebietscharakteristik dargestellt. (RIN (2008))

### 2.3.6 Aufbereitung von Fahrtzeit- und Reisezeitdaten aus FCD

Ein Ziel der Untersuchung ist es, relationsbezogene Reisezeitdaten bereitzustellen. Hierfür müssen die vom jeweiligen Anbieter bereitgestellten Fahrtzeitdaten aufbereitet werden. Im Folgenden wird die Vorgehensweise dieser Aufbereitung beschrieben. Dabei werden streckenbasierte und relationsbasierte Ansätze unterschieden. In beiden Fällen werden zuerst die Start- und Zielorte festgelegt.

#### Festlegung der Start- und Zielorte

Jede Relation bzw. jede Route benötigt einen Start- und einen Zielort. Die Koordinaten der Orte werden vorab für alle Orte bestimmt. Um unterschiedliche Datenquellen für das Straßennetzmodell verwenden zu können, sollten die Koordinaten unabhängig vom Straßennetz festgelegt werden. In dieser Untersuchung werden als Start- und Zielorte die Koordinaten verwendet, die Google mit dem Ortsnamen

bereitstellt. Jeder Ort wird dann mit Anbindungsstrecken über einen oder mehrere Knoten an das jeweilige Straßennetz angebunden. Die Anbindungsstrecken müssen so gewählt werden, dass eine Route nicht in einer einbahnigen Straße beginnt, die ein Wendemanöver erfordert, um den Zielort zu erreichen. Jeder Ort oder jede Anbindungsstrecke wird mit einer Zugangs-, Abgangs- und Parksuchzeit attribuiert, sodass die Reisezeiten berechnet werden können.

#### Streckenbasierte Fahrt- und Reisezeitermittlung

Die Fahrzeitermittlung erfolgt streckenbasiert, wenn die Fahrtzeitdaten auf der Ebene von Strecken verfügbar sind. Das ist der Fall bei den Datenquellen HERE, INRIX und TomTom. Für eine streckenbasierte Fahrzeitermittlung werden folgende Aufbereitungsschritte durchgeführt:

- Ausgangspunkt:  
Ausgangspunkt für die Fahrzeitermittlung ist ein Streckennetz mit Geschwindigkeitsdaten. Für jede Strecke liegen für alle oder ausgewählte Zeiträume Geschwindigkeitsdaten vor. Je nach Datenquelle kann dies eine repräsentative Geschwindigkeit oder eine Menge von Perzentil-Geschwindigkeiten sein.

- **Geschwindigkeitsbeschränkungen:**  
Die gemessenen Geschwindigkeitswerte können die zulässige Geschwindigkeit oder die Richtgeschwindigkeit auf Autobahnen überschreiten. Für die Analyse der Angebotsqualität und für die Ermittlung der Reisezeitzuverlässigkeit sollten Werte, die Geschwindigkeitsvorgaben überschreiten, korrigiert werden.
  - **Räumliche Lücken bei Geschwindigkeitsdaten:**  
Geschwindigkeitsdaten liegen nicht immer für das komplette Netz vor. Es können Daten für einzelne Strecken einer Straßenfunktionsklasse (Functional-Road-Class FRC) oder für eine komplette Straßenfunktionsklasse (z. B. Erschließungsstraßen) fehlen. In diesem Fall müssen die Geschwindigkeitsdaten geschätzt werden. Sofern Verkehrsstärken vorliegen, kann das mit Hilfe von CR-Funktionen erfolgen.
  - **Zeitliche Lücken bei Geschwindigkeitsdaten:**  
Geschwindigkeitsdaten können auf einzelnen Strecken für einzelne Zeiträume fehlen. Diese Geschwindigkeitsdaten können entweder aus den Geschwindigkeiten vergleichbarer Tageszeiten oder aus Geschwindigkeitsganglinien vergleichbarer Strecken übernommen werden.
  - **Festlegung einer Route:**  
Für jede Relation wird eine Route als eine Folge von Strecken definiert. Die Festlegung kann durch eine Bestwegsuche erfolgen, bei der die Geschwindigkeit im unbelasteten Netz oder in der Nebenverkehrszeit zugrunde gelegt wird. Die Fahrtzeiten werden dann für diese Streckenfolge ermittelt. Die Route wird auch dann beibehalten, wenn es tageszeitabhängig eine schnellere Route gibt.
  - **Festlegung der Abfahrtszeitpunkte:**  
Die Fahrtzeiten einer Route werden für ausgewählte Abfahrtszeitpunkte ermittelt. Für jeden Abfahrtszeitpunkt kann sich eine andere Reisezeit ergeben.
  - **Statische oder dynamische Fahrtzeitermittlung:**  
Bei der statischen Fahrtzeitermittlung, wird für alle Strecken der Route die Fahrtzeit zum Abfahrtszeitpunkt am Startort verwendet. Bei der dynamischen Fahrtzeitermittlung werden für alle Strecken die Fahrtzeiten zum Zeitpunkt der Durchfahrt verwendet. Bei kurzen Routen werden die Unterschiede zwischen der statischen und der dynamischen Fahrtzeitermittlung klein sein.
  - **Reisezeitermittlung:**  
Die Fahrtzeiten der Route werden um die Zugangs-, Abgangs- und Parksuchzeiten ergänzt.
  - **Identifikation von Baustellen:**  
Die Identifizierung von Baustellen oder anderen Ursachen von Störungen lässt sich in historischen Fahrtzeiten nur schwer oder gar nicht durchführen, da die Analyse historischer Fahrtzeitdaten in der Regel einen längeren Datumsbereich umfasst. Ein Zusammenhang zwischen Fahrtzeiten und Baustellensituationen lässt sich dann untersuchen, wenn die Lage der Baustellen bekannt ist und wenn die Baustelle im gesamten analysierten Datumsbereich vorhanden war.
- Die genannten Aufbereitungsschritte können für die mittleren Fahrtzeiten uneingeschränkt durchgeführt werden. Bei der Verwendung von Perzentilen der Fahrtzeit ist mit höheren Perzentilen eine ansteigende Überschätzung der Fahrtzeiten zu erwarten (Kapitel 2.1.1). Dennoch werden auch diese Berechnungen durchgeführt, um Hinweise auf die Auswirkungen von zufälligen Störungen zu erlangen.

### **Relationsbasierte Fahrt- und Reisezeitermittlung**

Die Fahrtzeitermittlung erfolgt relationsbasiert, wenn die Fahrtzeitdaten nur für eine Relation zwischen zwei Punkten verfügbar sind. Das ist bei der Datenquelle Google der Fall. Für eine relationsbasierte Fahrtzeitermittlung werden folgende Aufbereitungsschritte durchgeführt:

- **Festlegung einer Route:**  
Zwei Punkte können durch mehr als eine Route verbunden werden. Google liefert situationsabhängig Fahrtzeitdaten für die zeit kürzeste Route. Um sicherzustellen, dass die Fahrtzeiten immer für eine vorgegebene Route ermittelt werden, muss die Route über Zwischenpunkte definiert werden oder aus Teilrouten zusammengesetzt werden. Die Teilrouten müssen so gewählt werden, dass es keine sinnvollen Alternativrouten gibt. Bei langen Routen führt diese Vorgehensweise zu vielen Teilrouten und zu vielen Abfragen. Aus diesem Grund wurden im Projekt die

Fahrtzeiten der Datenquelle Google ohne Zwischenpunkte abgefragt. Die Route kann deshalb variieren.

- Festlegung der Abfahrtszeitpunkte:  
Die Fahrtzeiten einer Route werden für ausgewählte Abfahrtszeitpunkte ermittelt. Für jeden Abfahrtszeitpunkt kann sich eine andere Reisezeit ergeben.
- Statische oder dynamische Fahrtzeitermittlung:  
Google führt eine dynamische Fahrtzeitermittlung durch. Bei der Addition der Fahrtzeiten von Teilrouten werden allerdings der statische und der dynamische Ansatz vermischt.
- Reisezeitermittlung:  
Die Fahrtzeiten der Route werden um die Zugangs-, Abgangs- und Parksuchzeiten ergänzt.

## 2.4 Quellen für Floating-Car-Daten

Zum Zeitpunkt der Untersuchung stellten in Deutschland vier Anbieter Fahrtzeiten zur Verfügung (Stand: Mai 2018), die aus Navigationsgeräten oder Navi-Apps abgeleitet werden. Möglicherweise nutzen die Anbieter auch Mobilfunkdaten als Datenquelle. Die Anbieter Google Maps, HERE, INRIX und TomTom bieten ausgewählte Daten zum Teil kostenlos und umfassendere Daten gegen Bezahlung an. In der Regel werden sowohl aktuelle als auch historische Daten angeboten. Fahrtzeiten waren bei HERE, INRIX und TomTom auf der Ebene von Strecken und bei Google auf der Ebene von Routen und Relationen verfügbar.

### Google

Die Google LLC (Limited Liability Company) stellt umfangreiche Datenquellen im Internet bereit. Über eine API (Application Programming Interface) werden Softwareentwicklern und Dienstleistern Schnittstellen zur Verfügung gestellt. Damit können themenbezogene Daten durch eigene Anwendungen abgefragt und verarbeitet werden. Die Google Maps Platform bietet weltweit Standortdaten, Entfernungen und Fahrtzeiten zwischen beliebigen Orten. Die Fahrtzeiten basieren auf aktuellen und historischen Verkehrsdaten sowie auf Prognosemodellen. Mittels einer Anwenderapplikation werden über die API „Google Maps Distance Matrix“ bzw. „Google Maps

JavaScript“ http-Anfragen an Webserver der Google LLC gesendet. Die dafür notwendigen Übergabeparameter sind durch die jeweilige API definiert und beinhalten u. a.:

- Adresse oder Geokoordinate von Start- und Zielort
- Verkehrssystem (Kfz, Fußgänger, Radfahrer, öffentliche Verkehrsmittel)
- Start- oder Zielzeitpunkt (Jetzt oder beliebiger historischer/zukünftiger Zeitpunkt)

Die Rückgabe der abgefragten Daten für die Weiterverarbeitung erfolgte im Standarddatenformat JSON oder XML und beinhaltete u. a.:

- Adresse oder Geokoordinaten von Start- und Zielpunkten
- Fahrtweite
- Startzeitpunkt
- Fahrtzeit in drei Ausprägungen (siehe <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/intro>):
  - Best-Guess: „indicates that the returned duration in traffic should be the best estimate of travel time given what is known about both historical traffic conditions and live traffic. Live traffic becomes more important the closer the departure time is to now.“
  - Pessimistic: „indicates that the returned duration in traffic should be longer than the actual travel time on most days, though occasional days with particularly bad traffic conditions may exceed this value.“
  - Optimistic: “indicates that the returned duration in traffic should be shorter than the actual travel time on most days, though occasional days with particularly good traffic conditions may be faster than this value“.

Bei der Interpretation der Fahrtzeit und -weite für die unterschiedlichen Verkehrssysteme ist zu beachten, dass nur für den Kfz-Verkehr zurückgegebene Werte auf Daten aus historischen und aktuellen Verkehrszuständen beruhen. Dabei erfolgt serverseitig, in Abhängigkeit des zeitlichen Abstandes der Ankunftszeit am Zielort zum Zeitpunkt der Abfrage, eine unterschiedliche Gewichtung von aktuellen Verkehrs- und prognostischen Modelldaten. Die Rückgabewerte der übrigen Verkehrssysteme

hingegen werden derzeit aus Fahrplandaten des öffentlichen Nahverkehrs und Berechnungen mit einheitlichen angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeiten auf kürzesten Wegen ermittelt.

Die „Google Maps Distance Matrix API“ bzw. „Google Maps JavaScript API“ stellten keine detaillierten Routeninformationen zur Verfügung. Um Rückschlüsse auf die serverseitig berechnete Wegeketten, die den Reisezeit- und Entfernungsdaten zugrunde lag, zu erhalten, konnte auf die „Google Maps Directions API“ zurückgegriffen werden. Durch die zeitgleich ausgeführte Abfrage über diese API ergaben sich so erweiterte Informationen, die die Identifikation tageszeitlich veränderter Wegeführung zwischen identischen Start- und Zielpunkten bei weiteren Auswertungen ermöglichten.

## HERE

Auf die historischen Geschwindigkeitsdaten von HERE Traffic Analytics kann entweder über ein Webportal oder über eine API-Schnittstelle zugegriffen werden. Eine Abfrage bestand

- aus der Angabe eines Gebietes,
- der Auswahl der Straßenklasse,
- der Auswahl eines Datumsbereichs,
- der Auswahl von Wochentagen und
- der Auswahl von Zeiträumen des Tages (z. B. 5-Minuten-, 15-Minuten- oder Stunden-Werte).

HERE lieferte dann für alle gewählten Zeiträume die Daten in nicht aggregierter Form zurück. Diese konnten dann nachträglich aggregiert werden, wobei Mittelwerte, Standardabweichung u. a. selbst berechnet werden konnten. Außerdem konnten nicht gewünschte Tage nachträglich aussortiert werden. Zudem konnte bei der Abfrage noch zwischen „Cars“ und „Trucks“ unterschieden und so wenigstens näherungsweise Verkehrssystem-spezifische Abfragen vorgenommen werden.

Die im Projekt gelieferten Daten umfassten unter anderem:

- Die Anzahl der Messungen (Hits, Stichprobengröße) für jeden abgefragten Zeitraum
- Perzentile der Geschwindigkeit/Fahrtzeit
- Freifahrtgeschwindigkeit

- Geschwindigkeitsbeschränkung
- Ein von HERE definierter Konfidenzwert
- Statistische Kennwerte:
  - Harmonischer Durchschnitt der Geschwindigkeit
  - Standardabweichung der Geschwindigkeit
  - Standardabweichung der Reisezeit

Als Basis für die Geschwindigkeitsdaten konnte das Navigationsnetz von HERE verwendet werden.

## INRIX

Die Verkehrsdaten von INRIX (INRIX XD Traffic) können über die „INRIX Roadway Analytics Plattform“ abgefragt werden. Hierbei handelt es sich um eine webbasierte Benutzeroberfläche, mit deren Hilfe es möglich ist, Verkehrsinformationen aus INRIX XD Traffic zu analysieren und zu visualisieren. Die Daten können über eine Download-Funktion abgefragt werden. Die INRIX Roadway Analytics Plattform enthielt folgende Möglichkeiten:

- Über den Data Downloader konnten Daten aus INRIX XD Traffic direkt aus der Datenbank abgefragt werden. Die Abfragen konnten für jeden Straßenabschnitt und für jede beliebige Uhrzeit getätigt werden.
- Performance Charts produzierten Linien- und Balkendiagramme, für Vorher/Nachher-Untersuchungen oder für Visualisierungen von Analyse-Ergebnissen.
- Congestion Scan ermöglichte die Identifizierung von Problemgebieten einer Straße über Heatmaps.
- Bottleneck Ranking identifizierte alle Engpässe oder Staus in einer bestimmten Zeitperiode in einem Gebiet und klassifizierte diese nach der Anzahl an Vorkommnissen, der Länge und der Dauer.

Die Aufbereitung größerer Datenbankabfragen von historischen Geschwindigkeitsdaten musste bei INRIX direkt in Auftrag gegeben werden. Die historischen Daten wurden in Form von Archivdaten (INRIX XD Archive) für das gewählte Untersuchungsgebiet und für den ausgewählten Zeitraum geliefert. Bei den XD Archive Daten handelt es sich um minutlich erfasste Geschwindigkeiten auf einem Stra-

ßensegment. Die XD Archive Daten werden aus dem Real-Time-Datenprodukt von INRIX abgeleitet. Für die Erzeugung der Real-Time-Daten verwendet INRIX eine Kurzfristprognose, um die aus der Latenzzeit von 60-90 Sekunden resultierenden Diskrepanzen zu reduzieren. Der Wert, der den Nutzern „jetzt“ geliefert wird, beruht auf etwa 1 bis 2 Minuten alten Messdaten. INRIX führt Hochrechnungen durch (auch mithilfe von künstlicher Intelligenz), um die Geschwindigkeit basierend auf der aktuellen Situation und historischen Daten etwa eine Minute in die Zukunft zu prognostizieren. Dieser „Speed Optimized Estimate“ genannte Wert wird gespeichert und fließt in das Produkt XD Archive ein, das im Projekt verwendet wurde. Für das XD Archive-Produkt werden allerdings zusätzlich auch noch solche Daten mitberücksichtigt, die für die Verwendung im Real-Time-Produkt „zu spät“ angekommen sind. Schließlich wird eine Ex-Post-Korrektur der Vorhersagewerte (Speed Optimized Estimate) mit allen tatsächlich gemessenen Daten vorgenommen.

Diese XD Archive Daten wurden dann nachträglich aggregiert, um Mittelwerte zu berechnen. Die im Projekt gelieferten Daten umfassten unter anderem:

- Freifahrtgeschwindigkeit
- Harmonischer Durchschnitt der Geschwindigkeit des Zeitraums
- Historische Durchschnittsgeschwindigkeit
- Geschwindigkeitsbeschränkung
- Ein von INRIX definierter Konfidenzwert

Zum Zeitpunkt der Berichtsfertigstellung liefert INRIX auch standardmäßig 5 Perzentile der Geschwindigkeit: 5 %, 25 %, 50 %, 75 % und 95 %. Perzentile in 5%-Schritten können auf Anfrage bereitgestellt werden (Stand: 2020).

Als Basis für die Verortung der Daten diene ein nicht routingfähiges OpenStreetMap-Netz.

### TomTom

Auf die historischen Geschwindigkeitsdaten von TomTom kann entweder über das webbasierte Traffic Stats Webportal oder über die Traffic Stats API-Schnittstelle zugegriffen werden. Über das Traffic Stats Portal können individuelle Datenbankabfragen erstellt, bearbeitet, gespeichert und abgerufen

werden. Für große Datenabfragen eignet sich die Traffic Stats API. Eine benutzerdefinierte Abfrage wird spezifiziert durch

- die Auswahl von Routen bzw. die Auswahl eines Gebiets (Definition einer Bounding Box, mit der Möglichkeit, nach Straßenklasse zu filtern),
- einen Datumsbereich (ein Tag bis zu mehreren Jahren – unerwünschte Tage, wie z. B. Feiertage, können herausgefiltert werden) und
- über frei definierbare Zeiträume (z. B. Montag, 7:30 bis 8:00 Uhr)

Zudem kann bei der Abfrage noch zwischen „Private Cars“ und „Fleet“ unterschieden und so näherungsweise verkehrssystemspezifische Abfragen vorgenommen werden. Die im Projekt gelieferten Daten umfassten unter anderem:

- Die Anzahl der Messungen (Hits, Stichprobengröße) für jeden abgefragten Zeitraum
- Perzentile der Geschwindigkeit/Fahrtzeit
- Freifahrtgeschwindigkeit
- Geschwindigkeitsbeschränkung
- Statistische Kennwerte:
  - Harmonischer Durchschnitt der Geschwindigkeit
  - Standardabweichung der Geschwindigkeit
  - Standardabweichung der Reisezeit

Als Basis für die Geschwindigkeitsdaten kann das Navigationsnetz von TomTom (TomTom MultiNet) verwendet werden.

Methoden der Fahrzeitermittlung	Datenquelle	Zeitraum
Streckenbasiert, modellierte Fahrzeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsnachfragemodelle</li> <li>PTV-Validate</li> <li>Landesverkehrsmodell Bayern</li> </ul>	Werktag Mo-Fr <ul style="list-style-type: none"> <li>SVZ (unbelastetes Netz)</li> <li>HVZ (belastetes Netz)</li> </ul>
Streckenbasiert, FCD	<ul style="list-style-type: none"> <li>HERE (Mittelwert, Perzentile)</li> <li>INRIX (Best-Guess/Speed optimized estimate)</li> <li>TomTom (Mittelwert, Perzentile)</li> </ul>	Werktag Mo-Fr <ul style="list-style-type: none"> <li>19 Abfahrten für jede Stunde des Tages zwischen 04:00 und 22:00 Uhr</li> </ul>
Relationsbasiert, FCD	<ul style="list-style-type: none"> <li>Google (Best-Guess)</li> </ul>	

Tab. 3-1: Methoden und Datenquellen zur Ermittlung von Fahrzeiten für ausgewählte Relationen

### 3 Analyse ausgewählter Relationen

Um die Aussagekraft unterschiedlicher Datenquellen und Datenanbieter zu untersuchen, wurden in einem ersten Schritt Fahrzeiten für 16 ausgewählte Relationen und für festgelegte Zeiträume mit drei unterschiedlichen Methoden und unter Nutzung aller zugänglichen Datenquellen ermittelt und verglichen. Für jede Methode wurden die Fahrzeiten nach Möglichkeit aus mehr als einer Datenquelle bestimmt. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die Methoden, die Datenquellen und die untersuchten Zeitfenster.

#### 3.1 Auswahl der Relationen

Tabelle 3-2 zeigt die ausgewählten Relationen und die Eigenschaften der zugehörigen Routen. Für jede Relation wurden die Hin- und Rückrichtung untersucht, sodass sich insgesamt 16 Relationen ergeben. Pro Relation wurde die Route für die Untersuchung ausgewählt, die von Google als Standardroute vorgeschlagen wird. Die in der Tabelle dargestellten Fahrzeiten und Entfernungen wurden mit Google ermittelt. Die Baustellendaten wurden von der BAST bereitgestellt. Grundlage sind die Baustellenanmeldungen der Länder für das Jahr 2018.

Bei der Auswahl der Relationen wurden folgende Punkte berücksichtigt:

- Alternativroute: die Relationen sollen mehr als eine Route aufweisen.
- Baustellen: für eine Route sollen Fahrzeiten für Zeiträume mit und ohne Baustelle vorliegen.
- Autobahnen: mindestens zwei Routen sollen keine Autobahnen nutzen.

- Verkehrsnachfragemodelle: ein Teil der Routen soll in den Landesverkehrsmodellen Sachsen und Bayern enthalten sein.
- Regelmäßige Störungen: Die Routen sollen in der Hauptverkehrszeit regelmäßig Fahrzeitverlängerungen aufweisen.

#### 3.2 Ermittlung der Fahrzeiten

Für die ausgewählten Relationen wurden Fahrzeiten einer ausgewählten Route mit drei Methoden ermittelt:

- Streckenbasierte Ansätze mit modellierten Reisezeiten:  
Die Fahrzeiten einer Route wurden mit einem Verkehrsnachfragemodell ermittelt. Dazu wurden die Fahrzeiten über alle Strecken im unbelasteten und im belasteten Netz aufsummiert. Für die Untersuchung wurde das deutschlandweite Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate genutzt. Der Vergleich von identischen Relationen in mehreren Verkehrsnachfragemodellen zeigte die Abweichung, die in kalibrierten Verkehrsnachfragemodellen auftreten kann.
- Streckenbasierte Ansätze mit FCD:  
Die Fahrzeiten einer Route wurden aus FCD ermittelt, die von den Datenanbietern HERE, INRIX und TomTom auf der Ebene des Streckennetzes bereitgestellt wurden. Grundlage waren FCD der Werkstage (Mo-Fr) des Jahres 2017. Werkstage in den Weihnachtsferien (2.1. bis 6.1. und 25.12. bis 29.12.), in den Osterferien (10.4. bis 21.4.), in den Herbstferien (30.10. bis 3.11.) und Brückentage (26.5., 2.10.) wurden nicht berücksichtigt. Bei den Daten von HERE und TomTom standen für jede Stunde des Tages zwi-

Relation	VFS	Start- und Zielort	Routen	ausgewählte Route	Straßennummern	Baustellen (Summe aus Hinrichtung und Rückrichtung) (2018) [km]	Gesamtlänge [km]	Anteil Autobahn	Anteil Bundesstraße	Anteil andere Straßenklassen	Fahrtzeit min [min]	Fahrtzeit max [min]	Faktor max/min [-]
1	0	Stuttgart-München	1	✓	A8, A99, A9, B27	1,5	233	90 %	5 %	5 %	130	240	1,85
			2		A96, A7, A8, B27	10,3	260	85 %	12 %	2 %	160	260	1,63
2	0	Frankfurt-Köln	1	✓	A3	6,5	190	89 %	7 %	4 %	110	190	1,73
			2		A5, A45, A4	15	217	94 %	2 %	4 %	130	220	1,69
3	I	Stuttgart-Karlsruhe	1	✓	A8, B14	0	74	75 %	9 %	16 %	50	120	2,40
			2		A8, B10, B293, B14	0	81	33 %	61 %	5 %	65	160	2,46
			3		A8, B27	0	78	82 %	18 %	1 %	50	120	2,40
4	I	Köln-Dortmund	1	✓	B54, A45, A1, A3, B55a	13,6	100	86 %	7 %	6 %	65	140	2,15
			2		B55a, A3, A52, A40	10,5	106	92 %	4 %	4 %	65	170	2,62
5	I	Leipzig-Dresden	1	✓	B2, A38, A14, A4, B6	0	122	84 %	11 %	6 %	70	130	1,86
			2		B170, A4, A13, B98, B169, A14, A38, B2	0	166	41 %	37 %	23 %	120	170	1,42
6	I	Villingen-Sigmaringen	1	✓	B313, B311, B523	0	75	0 %	99 %	1 %	65	85	1,31
			2		B463, B27	0	87	11 %	78 %	11 %	75	110	1,47
7	I	Gießen-Herborn	1	✓	B255, A45, B49, B249	3,6	38	61 %	33 %	7 %	26	45	1,73
			2		B255, A45, A485	3,6	47	89 %	5 %	6 %	35	55	1,57
8	II	Erding-Ebersberg	1	✓	St2080, A94, St2331, B388	0	31	23 %	7 %	71 %	35	45	1,29
			2		ST2086, St2331, B388	0	29	0 %	9 %	91 %	40	45	1,13

Tab. 3-2: Testrelationen

schen 04:00 und 22:00 Uhr Perzentile der Geschwindigkeiten in 5 % Schritten und der Mittelwert zur Verfügung.

- Relationsbasierte Ansätze mit FCD:

Die Fahrtzeiten einer Route wurden aus FCD übernommen, die vom Datenanbieter Google für eine komplette Route bereitgestellt wurden (Google Best-Guess). Für jede Stunde des Tages zwischen 04:00 und 22:00 Uhr wurde ein Wert für einen in der Zukunft gelegenen Werktag (5.11.2018 – 9.11.2018) abgefragt.

Bei der Fahrzeitermittlung für Pkw mit streckenbasierten FCD wurde wie folgt vorgegangen:

- Es wurde die Fahrtzeit der Relation für jede Stunde des Tages zwischen 04:00 und 22:00 Uhr aus den FCD der Strecken ermittelt.

- Die Fahrzeitermittlung erfolgte statisch, d. h. es wurden für alle Strecken der Route die Fahrtzeiten der betrachteten Stunde herangezogen. Bei Routen mit einer Fahrtzeit von weniger als einer Stunde führte diese Vorgehensweise gegenüber einer dynamischen Fahrzeitermittlung zu keinem Unterschied, da die Daten nicht feiner differenziert vorlagen.
- Die Fahrzeitermittlung mit den Daten von HERE und TomTom erfolgte für vier Perzentile:
  - Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile der Geschwindigkeit: 10 % aller Fahrzeuge sind langsamer.
  - Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile der Geschwindigkeit: 25 % aller Fahrzeuge sind langsamer.

- Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile der Geschwindigkeit: 50 % aller Fahrzeuge sind langsamer.
- Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile der Geschwindigkeit: 75 % aller Fahrzeuge sind langsamer.

Bei den modellbasierten Fahrtzeiten wurden die tageszeitabhängigen Fahrtzeiten aus den Ergebnissen einer Tagesumlegung wie folgt abgeschätzt:

- 00:00 bis 06:00 Uhr: Fahrtzeit im unbelasteten Netz
- 06:00 bis 09:00 Uhr: Fahrtzeit im belasteten Netz
- 09:00 bis 16:00 Uhr: Fahrtzeit im unbelasteten Netz · 4/3
- 16:00 bis 19:00 Uhr: Fahrtzeit im belasteten Netz
- 19:00 bis 24:00 Uhr: Fahrtzeit im unbelasteten Netz

### 3.3 Validierung der Fahrtzeitdaten

Um die Qualität der Fahrtzeitdaten der Datenanbieter zu validieren, wurden für zwei Relationen für einen Erhebungstag von der Universität Stuttgart gemessene Fahrtzeiten mit den Fahrtzeitdaten der untersuchten Datenquellen verglichen. Die Validierung erfolgte für die Relationen Stuttgart–Karlsruhe und Karlsruhe–Stuttgart. Erhebungstag ist der 19.04.2018. Hierzu wurden nicht die historischen Fahrtzeiten herangezogen, sondern die am Erhebungstag von den Anbietern angegebenen aktuellen Fahrtzeiten. Die Fahrtzeiten für die Validierung wurden mit zwei Methoden erfasst:

- Für die gesamte Relation: Messfahrten mit Fahrzeugen (Erfassung über GNSS).
- Für einen Teil der Route auf der Autobahn: Fahrtzeitmessungen mit Kennzeichenerfassungssystemen.

Für diese Daten erfolgte ein Abgleich der empirischen Reisezeiten mit den Reisezeitauswertungen von Google Maps zu den identischen Zeitpunkten am Erhebungstag als zusätzliche Dateninformation.

### Fahrtzeitmessungen mit Kennzeichenerfassungssystemen

Der Verkehr wurde auf der Autobahn A8 von Stuttgart nach Karlsruhe und in der Gegenrichtung mit automatischen Kennzeichenerfassungssystemen (ANPR) erhoben. Die Erhebung erfolgte an zwei Querschnitten (Karlsbad und Sindelfinger Wald) von 04:00 Uhr bis 22:00 Uhr. Die Erfassung der Kennzeichen erfolgte aus datenschutzrechtlichen Gründen von hinten. In Bild 3-1 sind die Positionen der zwei Messstellen dargestellt. Für die Messung kommt je Fahrstreifen ein Kennzeichenerfassungssystem zum Einsatz. Am Messquerschnitt Karlsbad wurden 6 Kennzeichenerfassungssysteme aufgebaut (3 Fahrstreifen je Richtung) und am Messquerschnitt Sindelfinger Wald 8 (4 Fahrstreifen je Richtung).

Insgesamt wurden in Richtung Karlsruhe 17.448 Fahrzeuge und in Richtung Stuttgart 18.247 Fahrzeuge an beiden Messstellen erfasst. Aus diesen Einzelfahrtzeiten werden Perzentile der Fahrtzeiten abgeleitet. Dazu werden die Fahrtzeiten bezogen auf den Zeitpunkt der Einfahrtzeit am Startquerschnitt in 5-Minutenintervallen ausgewertet. Führt ein Fahrzeug bspw. um 07:00 Uhr über den Startquerschnitt und dieses Fahrzeug benötigte 30 Minuten bis zum Zielquerschnitt, dann wird dieses Fahrzeug in den Schaubildern für 07:00 Uhr mit einer Fahrtzeit von 30 Minuten eingetragen. Bild 3-2 zeigt die Ergebnisse der Fahrtzeitmessungen für beide Fahrtrichtungen. Die Abbildung enthält drei Arten von Fahrtzeiten:

- Fahrtzeiten von Einzelfahrzeugen (graue Punkte): Dargestellt sind die Einzelfahrtzeiten der Fahrzeuge, die zwischen dem 10%-Perzentil



Bild 3-1: Lage der ANPR-Messstellen © OpenStreetMap-Mitwirkende

und dem 70%-Perzentil liegen. Die 30 % langsamsten Fahrtzeiten und die 10 % schnellsten Fahrtzeiten sind nicht dargestellt, um so Lkw-Fahrtzeiten, Fahrzeuge mit Pausenzeiten und sonstige Ausreißer herauszufiltern.

- Fahrtzeiten der Messfahrten (weiße Punkte mit schwarzem Rahmen): Die Fahrer der Messfahrzeuge hatten die Aufgabe im Verkehr mitzuschwimmen. Deshalb liegen die Fahrtzeiten ab 06:00 Uhr nahe am Median. Vor 06:00 Uhr wird der Median von einem hohen Lkw-Anteil dominiert.
- Perzentile der Fahrtzeiten: Es sind die Perzentile aller Fahrzeuge in 10 % Schritten dargestellt. Lkw und Pkw werden dabei nicht differenziert. Es ist erkennbar, dass die Fahrtzeiten für zwischen dem 10%-Perzentil und dem 60%-Perzentil ab 06:00 Uhr nahe beieinanderliegen. Vor 06:00 Uhr ist der Anteil der Lkw so hoch, dass die Lkw-Fahrtzeit den Median und das 60%-Perzentil beeinflussen. Das liegt auch daran, dass

die Lkw größere Fahrtweiten aufweisen als Pkw und deswegen überproportional detektiert werden.

Aus dem Verlauf der Fahrtzeiten lassen sich die Fahrtzeitverlängerungen in der morgendlichen und abendlichen Hauptverkehrszeit erkennen. Für die Zwecke der Validierung ist vor allem die Störung zwischen Karlsruhe und Stuttgart zwischen 16:00 und 18:00 Uhr interessant.

In Bild 3-3 sind die Perzentile der Fahrtzeitmessung den von Google prognostizierten Fahrtzeiten gegenübergestellt. Die Abfrage der Google-Fahrtzeiten erfolgte in Echtzeit in 5-Minuten-Intervallen. Aus dem visuellen Vergleich der Ganglinien kann man eine gute Übereinstimmung zwischen dem Median der Messungen und den Google-Fahrtzeiten erkennen. Für eine Quantifizierung der Abstände zwischen den Perzentilen und den Google-Fahrtzeiten werden die mittleren Abstandsquadrate zwischen 04:00 und 22:00 Uhr in Intervallen von 5-Minuten ermittelt. Aus Tabelle 3-3 ist ersichtlich, dass auf der

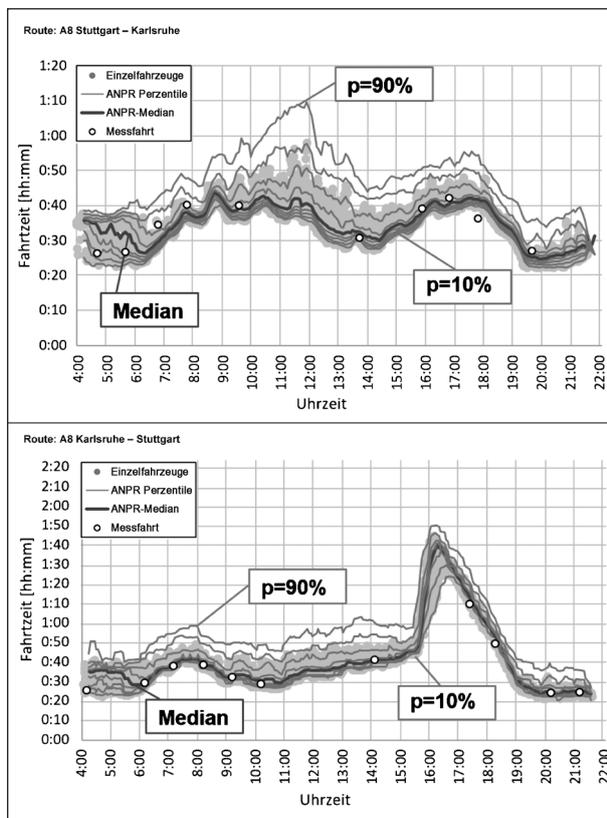


Bild 3-2: Ergebnisse der ANPR-Fahrtzeitmessungen und der Messfahrten. Einzelwerte und Perzentile bezogen auf die Einfahrtzeit am Startquerschnitt.

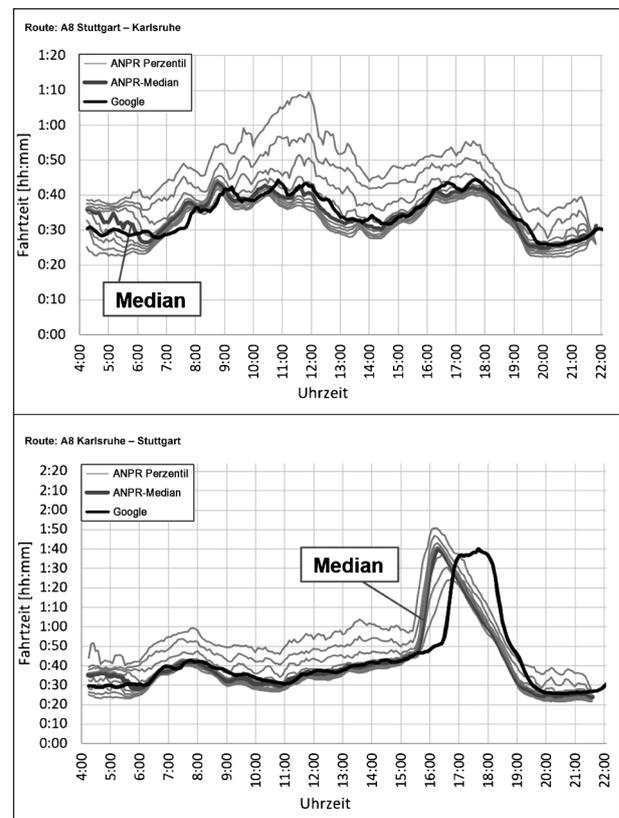


Bild 3-3: Vergleich zwischen den ANPR-Perzentilen und Google

	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %
Stuttgart nach Karlsruhe	238	201	170	<b>151</b>	153	180	297	522	802
Karlsruhe nach Stuttgart	489	477	471	453	<b>443</b>	457	571	760	1.024

Die Perzentile mit der geringsten Abweichung sind fett markiert.

Tab. 3-3: Summe der Abweichungen in Sekunden zwischen dem Perzentil-Werten der ANPR-Messung und den Google-Werten

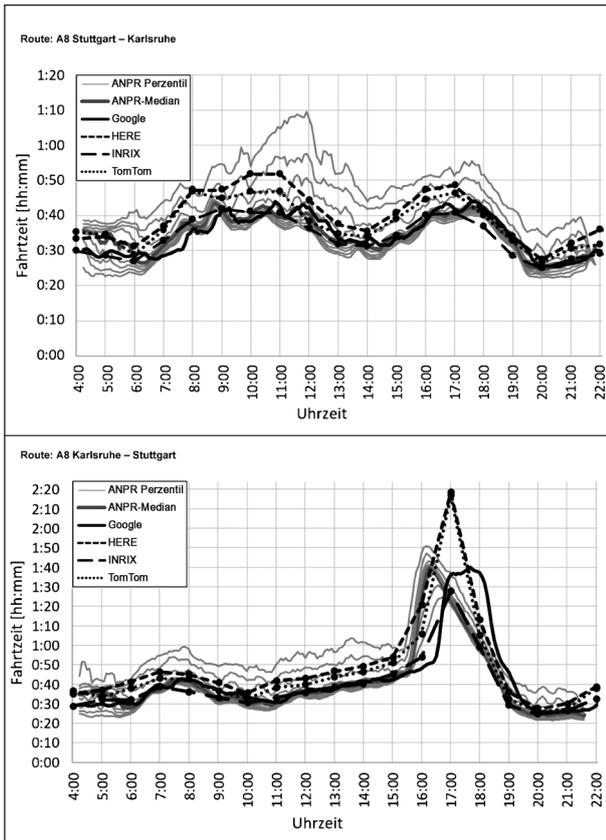


Bild 3-4: Vergleich ANPR, Google, HERE (75 %), INRIX und TomTom (75 %)

Route von Stuttgart nach Karlsruhe das 40%-Perzentil am besten zu den Google-Werten passt. Auf der Route von Karlsruhe nach Stuttgart erreicht das 50%-Perzentil die beste Übereinstimmung. Es lässt sich erkennen, dass die Google-Werte bei Fahrzeitänderungen gegenüber den Messungen eine gewisse Zeitverzögerung aufweisen. Das wird besonders bei der Störung zwischen Karlsruhe und Stuttgart deutlich. Beim Vergleich der Messdaten mit den Google-Daten muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich bei den ANPR-Daten um historische Fahrzeitdaten handelt, die die tatsächliche Fahrzeit angeben. Bei den Google-Daten handelt es sich um prognostizierte Daten.

In Bild 3-4 werden die Ganglinien aus Bild 3-3 um die Ganglinien der Datenquellen INRIX (Vorher-

sagewert), HERE (75%-Perzentil) und TomTom (75%-Perzentil) für Datenquellen HERE und TomTom dargestellt. Der Vergleich der Ganglinien zeigt Folgendes:

- Der Median von HERE und TomTom liegt näher an den Messdaten als das 75%-Perzentil.
- In Fahrtrichtung Stuttgart – Karlsruhe liefert Google eine etwas bessere Übereinstimmung mit den Messdaten als der Median von HERE und TomTom und der INRIX-Vorhersagewert. Alle drei Werte liefern etwas kürzere Fahrzeitdaten als der Median der Messwerte.
- In Fahrtrichtung Karlsruhe – Stuttgart liefern alle Datenquellen beim Median ähnliche Werte mit Ausnahme des gestörten Zeitraums 16:00 bis 18:00 Uhr. Hier schafft es keine Datenquelle, den Anstieg der Fahrzeiten richtig abzubilden. Beim Rückgang der Fahrzeiten zeigen die Google-Daten die größte Verzögerung. Bei Google handelt es sich aber um prognostizierte Daten, bei den anderen Datenquellen vermutlich um historische Daten.
- Die Nutzung der 75%-Perzentile von HERE und TomTom für die Fahrzeitberechnung führt im Zeitraum der Störung zwischen Karlsruhe und Stuttgart zu Fahrzeiten, die nicht mit dem 75%-Perzentil der ANPR-Messung übereinstimmen. Hier zeigt sich, dass eine Aufsummierung von Perzentilen der Fahrzeit über mehrere Teilstrecken nicht zulässig ist. Diese Aussage gilt besonders, wenn nur Fahrzeitdaten eines Tages und nicht eines längeren Zeitraums verwendet werden.

Als Fazit der Validierung lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- Die mit ANPR gemessenen Fahrzeitdaten und die von Google prognostizierten Fahrzeitdaten stimmen für den Erhebungstag am besten überein, wenn bei den gemessenen Fahrzeiten der Median oder das 40%-Perzentil herangezogen

wird. Bild 3-5 zeigt die gleiche Darstellung für den Median.

- Bei den Datenquellen HERE und TomTom liefert der Median die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Fahrtzeitdaten.
- Die Google-Fahrtzeitdaten stimmen zu den meisten Tageszeiten gut mit den gemessenen Fahrtzeiten überein. Bei Änderungen der Fahrtzeiten weisen die Google-Daten eine gewisse zeitliche Verzögerung auf.
- Wenn Perzentile der Fahrtzeit über mehrere Teilstrecken aufsummiert werden, dann werden bei Perzentilen > 50 % die Fahrtzeiten überschätzt, bei Perzentilen < 50 % werden die Fahrtzeiten möglicherweise unterschätzt.

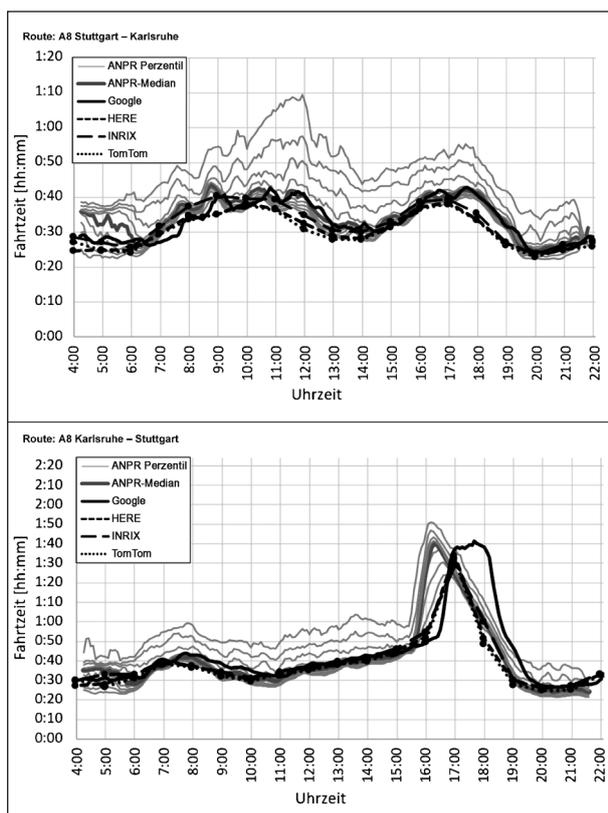


Bild 3-5: Vergleich ANPR, Google, HERE (Median), INRIX und TomTom (Median)

## Messfahrten mit Fahrzeugen

Für die Messfahrten kamen 6 Fahrer und 4 Fahrzeuge zum Einsatz. Jedes Fahrzeug wurde mit GNSS-Trackern ausgestattet, die in 1-Sekunden-Intervallen die exakte Position des Fahrzeugs aufzeichnen. Die Fahrten wurden zu 11 Zeitpunkten startend in Stuttgart Stadtmitte und zu 11 Zeitpunkten startend in Karlsruhe Stadtmitte durchgeführt. Die Abfahrtszeitpunkte der Messfahrzeuge sind in Tabelle 3-4 ersichtlich.

Als Definition für die Position von Stuttgart Stadtmitte bzw. Karlsruhe Stadtmitte wurden die Koordinaten gewählt, die von Google Maps bei den Routenabfragen gewählt wurden, um so eine Vergleichbarkeit der Daten herzustellen. Eine Darstellung der Start- bzw. Endpunkte der Messfahrten in Stuttgart und Karlsruhe sind in Bild 3-6 dargestellt, die gefahrene Route der Messfahrzeuge in Bild 3-7.

Die Route wird in Messquerschnitte unterteilt (Bild 3-7). Für jeden dieser Messquerschnitte werden im 5-Minuten-Takt bis zum Start- und Endpunkt Google-Echtzeit-Abfragen getätigt. Es liegen somit alle 5 Minuten die Fahrtzeiten zwischen allen Messquerschnitten vor. Über die GNSS-Tracker kann nachvollzogen werden, zu welchem Zeitpunkt sich jedes Messfahrzeug an den Messquerschnitten befunden hat. Verglichen wird die Fahrtzeit der Messfahrzeuge vom jeweiligen Messquerschnitt bis zum Zielpunkt der Fahrt (Stuttgart/Karlsruhe Stadtmitte) mit der zeitlich nächsten Google-Fahrtzeit. Benötigte ein Fahrzeug z. B. von einem Messquerschnitt 300 Sekunden bis zum Endpunkt und dieses Fahrzeug fuhr um 8:04:09 Uhr über diese Messstelle, dann wird diese Fahrtzeit mit der Google-Fahrtzeit um 8:05:00 Uhr von der gleichen Messstelle bis zum Endpunkt verglichen. Es entsteht zu jeder Messfahrzeug-Messquerschnitt-Kombination ein Wertepaar. Es liegen somit 15 Wertepaare für eine Messfahrt vor. Dies ergibt bei insgesamt 22 Messfahrten eine Summe von 330 (15\*22) Wertepaaren.

Für den Vergleich der von Google prognostizierten Werte und der Werte der Messfahrzeuge wird der

Relation	Verkehrszeit			
	SVZ	mHVZ	NVZ	aHVZ
Stuttgart-Karlsruhe (Uhrzeiten)	04:00, 05:00, 20:00	6:00, 07:00, 08:00	10:00, 14:00	16:00, 17:00, 18:00
Karlsruhe-Stuttgart (Uhrzeiten)	04:00, 20:00, 21:00	6:00; 07:00; 08:00	09:00, 10:00, 14:00	17:00, 18:00

Tab. 3-4: Abfahrtszeitpunkte der Messfahrzeuge

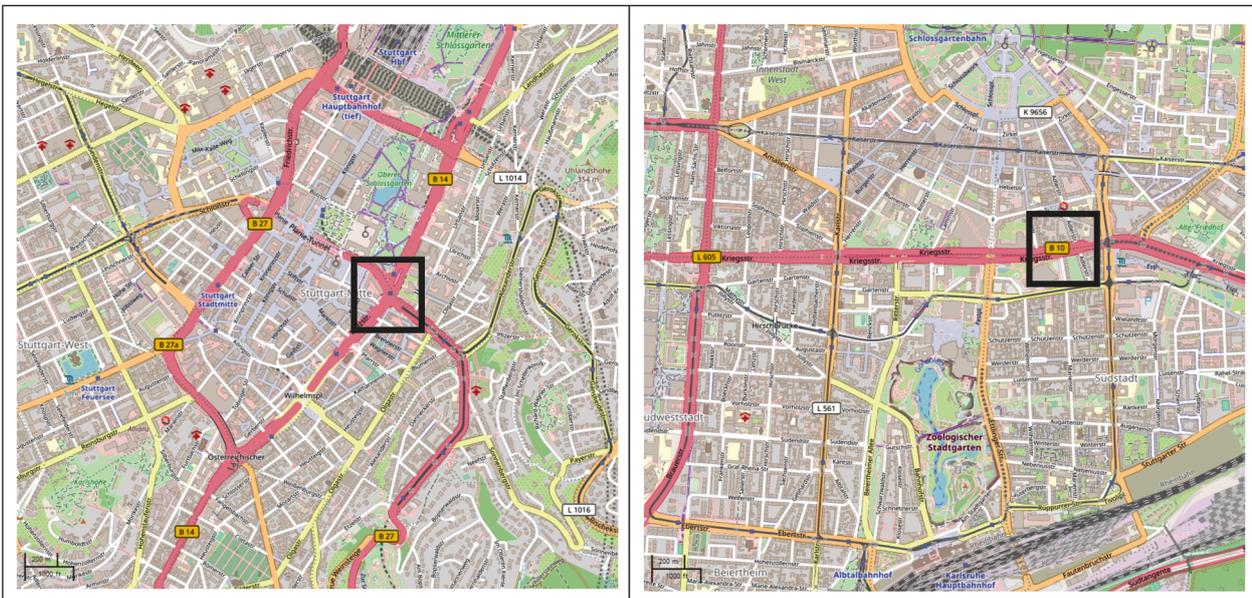


Bild 3-6: Start- bzw. Endpunkte (links Stuttgart, rechts Karlsruhe) © OpenStreetMap-Mitwirkende

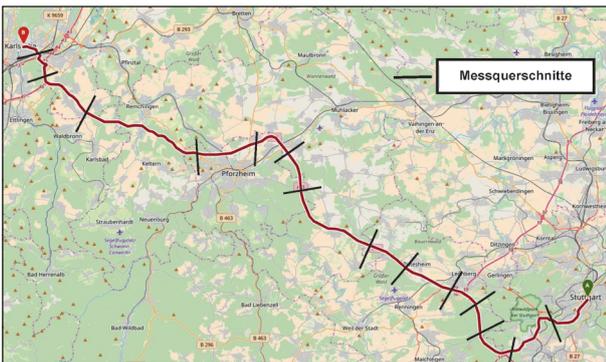


Bild 3-7: Route der Messfahrzeuge mit Messquerschnitten © OpenStreetMap-Mitwirkende

GEH-Wert verwendet. Dieses Gütemaß betrachtet die relativen und absoluten Abweichungen für ein Wertepaar. Der GEH-Wert wurde nach Geoffrey E. Havers benannt und ist wie folgt definiert (vgl. WebTAG, Department for Transport (2014)):

$$g_{GEH} = \sqrt{\frac{2 \cdot (m - c)^2}{m + c}}$$

mit

$g_{GEH}$  Gütemaß  $GEH$

$m$  Modellwert ( $m = \text{Model}$ )

$c$  Erhebungswert ( $c = \text{Count}$ )

Der GEH-Wert wurde eigentlich für den Vergleich stündlicher Verkehrsstärken entwickelt. Bei einer Modellvalidierung werden Abweichungen mit einem  $g_{GEH} \leq 5$  angestrebt. Da stündliche Verkehrsstärken

	GEH < 3	GEH < 5	GEH < 7	GEH < 10	GEH < 20
Stuttgart nach Karlsruhe	50 %	79 %	93 %	97 %	100 %
Karlsruhe nach Stuttgart	58 %	68 %	82 %	93 %	96 %

Tab. 3-5: GEH für den Vergleich der Messfahrten – Google

im Wertebereich zwischen 0 und etwa 5.000 liegen, werden die GEH-Bewertungen im Folgenden für den Vergleich von relationsbezogenen Fahrtzeiten herangezogen, da diese – gemessen in Sekunden – in einem ähnlichen Wertebereich liegen. Dabei werden folgende Bewertungen gesetzt:

- $g_{GEH} \leq 7$  : akzeptabel
- $g_{GEH} \leq 5$  : gut
- $g_{GEH} \leq 3$  : sehr gut

Eine Darstellung des GEH für den Vergleich der Messfahrten mit den von Google abgefragten Daten findet sich in Bild 3-8 bis Bild 3-9. Die analogen Darstellungen des GEH für die Vergleiche mit HERE, INRIX und TomTom befinden sich im Anhang.

Tabelle 3-5 zeigt den Anteil der Messpunkte, die einen GEH von 3, 5, 7, 10 und 20 erreichen. In Fahrtrichtung Stuttgart weisen knapp 80 % der Wertepaare eine gute oder sehr gute Übereinstimmung auf. In Fahrtrichtung Karlsruhe liegt dieser Wert aufgrund der großen Störung niedriger.

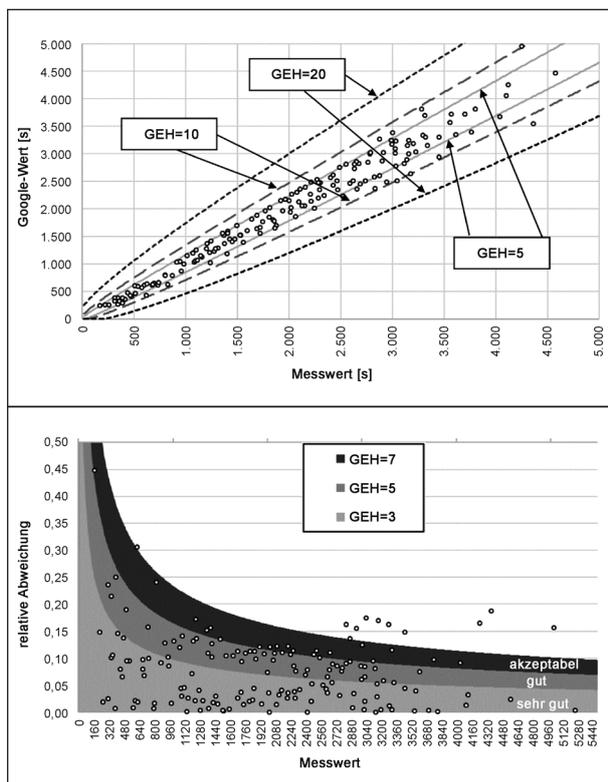


Bild 3-8: Vergleich der Messfahrten – Google für die Route A8 Stuttgart – Karlsruhe: Absolute Abweichungen mit GEH-Werten (oben), relative Abweichungen mit GEH-Werten (unten).

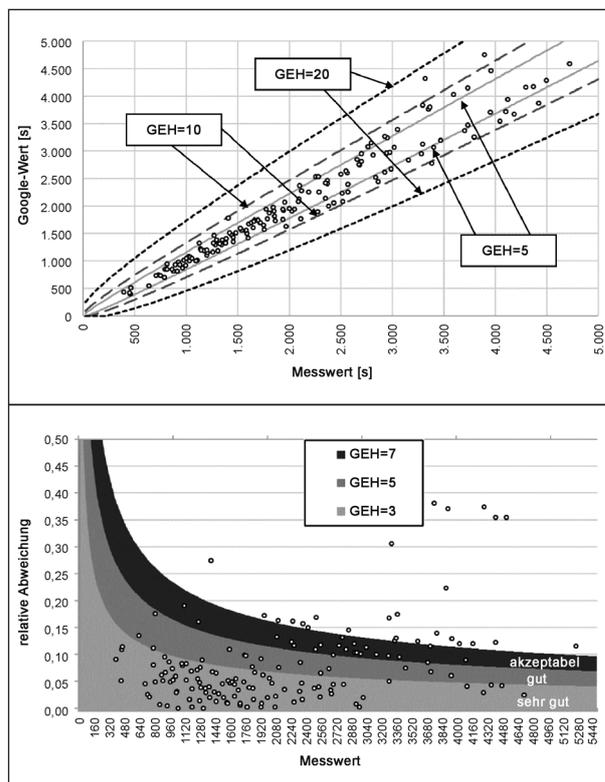


Bild 3-9: Vergleich der Messfahrten – Google für die Route A8 Karlsruhe – Stuttgart: Absolute Abweichungen mit GEH-Werten (oben), relative Abweichungen mit GEH-Werten (unten).

### 3.4 Vergleich der Datenquellen

Der Vergleich der Datenquellen umfasst die in Tabelle 3-2 dargestellten 16 Testrelationen. Für diese Testrelationen werden die Fahrzeitdaten der Datenquellen mit drei Methoden verglichen:

- Vergleich der Fahrzeiten im Tagesverlauf.
- Vergleich der mittleren Fahrzeiten und Verlustzeiten über alle Stunden des Tages.
- Paarweiser Vergleich der Abweichungen mit dem GEH-Wert.

#### 3.4.1 Fahrzeiten im Tagesverlauf

Für jede Testrelation werden mit der in Kapitel 3.2 beschriebenen Methode Fahrzeiten für jede Stunde des Tages zwischen 04:00 und 22:00 Uhr ermittelt. Auf diese Weise werden für jede Relation vier Abbildungen erstellt:

- Fahrzeiten für die 90%-Perzentile.
- Fahrzeiten für die 75%-Perzentile.

- Fahrzeiten für die 50%-Perzentile.
- Fahrzeiten für die 25%-Perzentile.
- Fahrzeiten für den Mittelwert.

Die Daten für Google und das Verkehrsnachfragemodell sind in allen Abbildungen einer Relation gleich.

In Bild 3-10 bis Bild 3-19 sind die Fahrzeitdaten für die Relation Stuttgart/Karlsruhe für die Hin- und Rückrichtung dargestellt. Die Grafiken zu den weiteren Testrelationen befinden sich im Anhang in Anlage 2.

Bei den 90%-Perzentilen liefert TomTom bei allen Testrelationen deutlich höhere Fahrzeiten als das 90%-Perzentil von HERE. Bei den 75%- und den 50%-Perzentilen liegen TomTom und HERE sehr eng zusammen. Die 25%-Perzentil-Schaubilder zeigen zumeist eine leicht höhere Fahrzeit bei HERE, als bei TomTom. Die größte Ähnlichkeit der Datenanbieter ist bei den 75%-Perzentil-Schaubildern ersichtlich. Hier liegen die Ganglinien von Google, HERE, INRIX und TomTom dicht beieinander. Sowohl Google, als auch INRIX geben ihren Vorher-

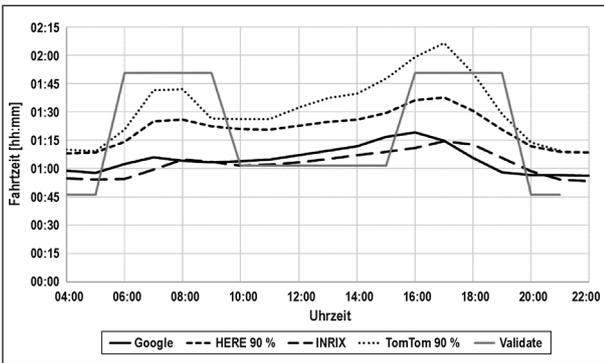


Bild 3-10: Vergleich der Fahrzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe)

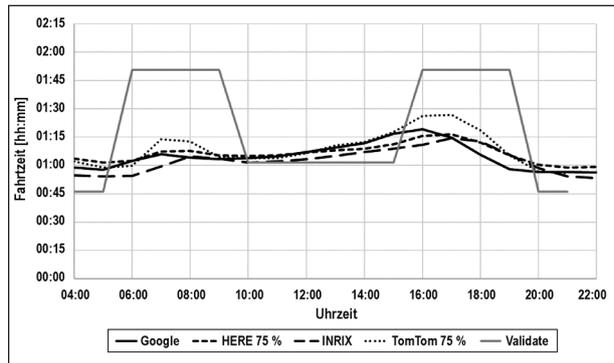


Bild 3-11: Vergleich der Fahrzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe)

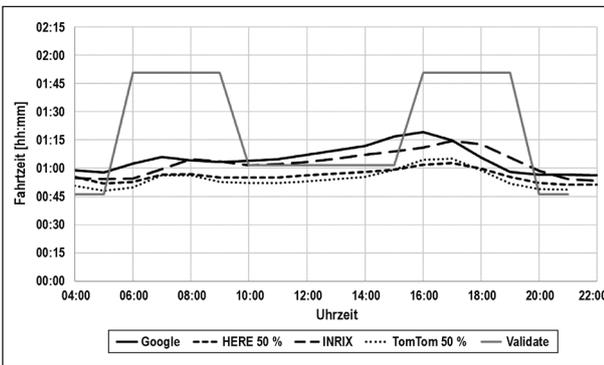


Bild 3-12: Vergleich der Fahrzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe)

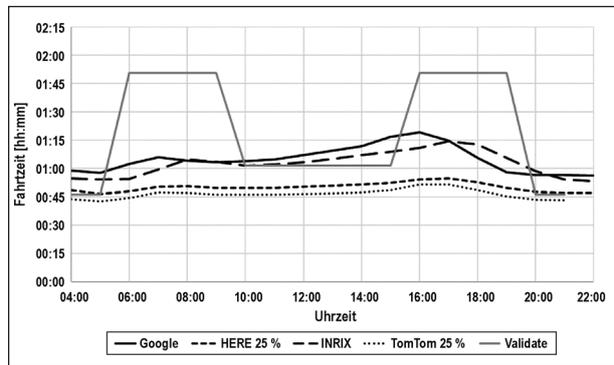


Bild 3-13: Vergleich der Fahrzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe)

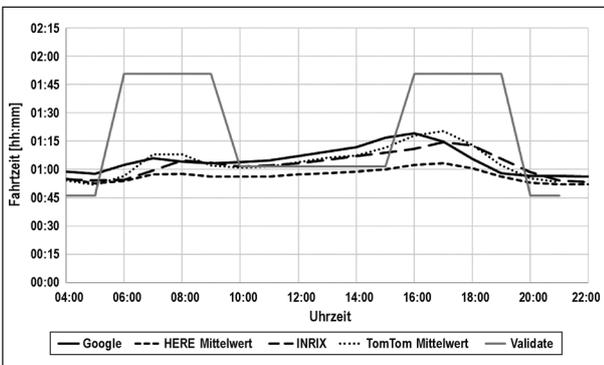


Bild 3-14: Vergleich der Fahrzeiten für den Mittelwert (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe)

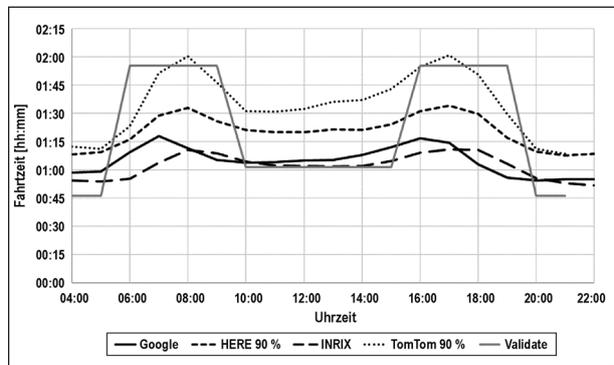


Bild 3-15: Vergleich der Fahrzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart)

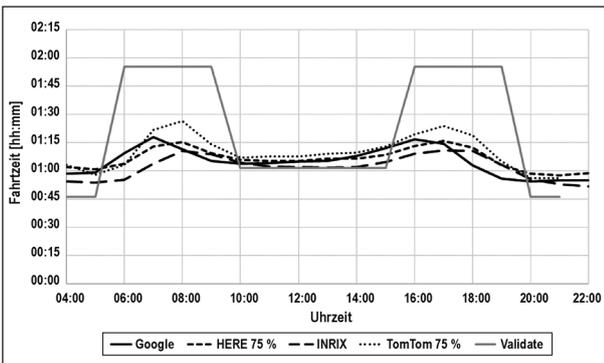


Bild 3-16: Vergleich der Fahrzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart)

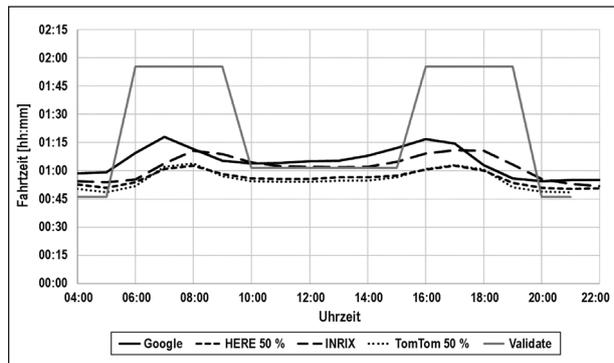


Bild 3-17: Vergleich der Fahrzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart)

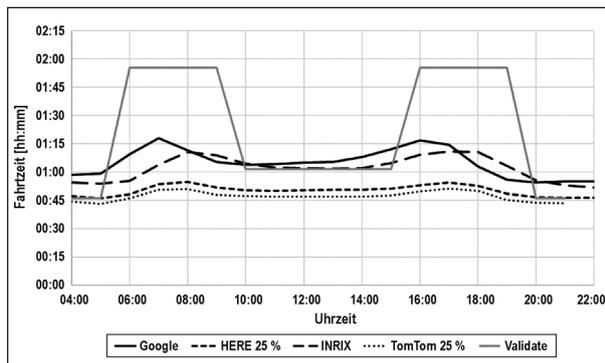


Bild 3-18: Vergleich der Fahrzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart)

sagewert der Fahrzeit im Bereich der 75%-Perzentile von HERE und TomTom an. Das könnte bedeuten, dass die interne Aufbereitung bei Google und INRIX vermutlich nicht den Median als Dateninformation an den Nutzer weitergibt, sondern den Wert des 75%-Perzentils.

In dem gezeigten Beispiel überschätzt das Verkehrsnachfragemodell Validate die Fahrzeiten im Spitzenstundenbereich und liegt in der Größenordnung des TomTom 90%-Perzentils. Die Vergleiche der Fahrzeiten der anderen Relationen im Anhang zeigen hier eine deutlich bessere Übereinstimmung. Dies bestätigt die Vermutung, dass auch ein in sich konsistentes Verkehrsnachfragemodell in unterschiedlichen Netzelementen eine unterschiedliche Genauigkeit der abgeleiteten Fahrzeiten liefert.

### 3.4.2 Mittlere Fahrzeiten und Verlustzeiten

Der zweite Vergleich stellt mittlere Fahrzeiten und Verlustzeiten eines Tages gegenüber. Die mittlere Fahrzeit eines Tages ergibt sich aus den Fahrzeiten der Stunden des Tages (04:00 bis 22:00 Uhr). Die Mittelwertbildung kann gewichtet mit der Zeit oder gewichtet mit der Nachfrage erfolgen. Als Approximation für die Nachfrage kann bei den Datenquellen HERE und TomTom die Zahl der Hits herangezogen werden. Als Soll-Fahrzeit wird die kürzeste Fahrzeit aller Stunden des Tages genutzt. Aus der Ist-Fahrzeit und der Soll-Fahrzeit kann eine Verlustzeit berechnet werden. Um die Verlustzeiten vergleichen zu können, werden sie auf die Länge der Relation bezogen. Damit ergeben sich die folgenden Fahrzeiten und Verlustzeiten:

Ist-Fahrzeit zeitgewichtet:

$$t_I^{Curr} = t_I^{WT} = \frac{\sum_{i \in I} t_i}{I}$$

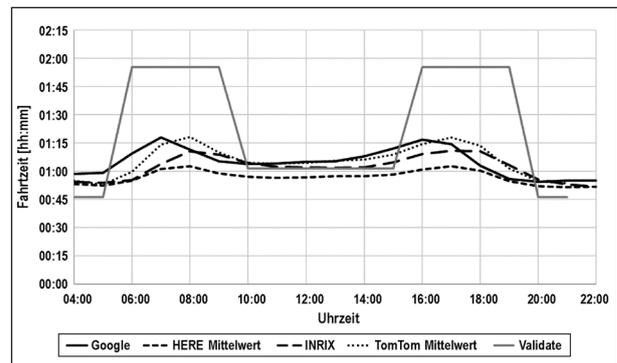


Bild 3-19: Vergleich der Fahrzeiten für den Mittelwert (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart)

Ist-Fahrzeit nachfragegewichtet:

$$t_I^{Curr} = t_I^{WD} = \frac{\sum_{i \in I} t_i \cdot d_i}{\sum_{i \in I} d_i}$$

Soll-Fahrzeit:

$$t_I^{Target} = \text{MIN}(t_i)$$

Verlustzeit pro Kilometer zeitgewichtet:

$$t_I^{DelayKm,WT} = \frac{\sum_{i \in I} \text{MAX}(t_i^{Curr} - t_I^{Target}, 0)}{I \cdot l}$$

Verlustzeit pro Kilometer nachfragegewichtet:

$$t_I^{DelayKm,WD} = \frac{\sum_{i \in I} \text{MAX}(t_i^{Curr} - t_I^{Target}, 0) \cdot d_i}{l \cdot \sum_{i \in I} d_i}$$

mit

$t_I^{WT}$  mittlere Fahrzeit eines Tages, gewichtet mit der Zeit (WT = weighted with time)

$t_I^{WD}$  mittlere Fahrzeit eines Tages, gewichtet mit der Nachfrage (WD = weighted with demand)

$t_i$  Fahrzeit im Zeitraum  $i$

$d_i$  Verkehrsnachfrage im Zeitraum  $i$

$l$  Länge der Relation

$i \in I$  Menge  $I$  der Zeiträume  $i$  eines Tages (Stunden)

Relation	$t_{Google}^{Opt}$	$t_{TomTom}^{P50}$	$t_{HERE}^{P50}$	$t_{TomTom}^{Mean}$	$t_{HERE}^{Mean}$	$t_{TomTom}^{P75}$	$t_{HERE}^{P75}$	$t_{INRIX}^{Best}$	$t_{Google}^{Best}$	$t_{TomTom}^{P90}$	$t_{HERE}^{P90}$	$t_{Google}^{Pess}$
Stuttgart-München	134	133	139	148	141	158	161	160	155	200	195	210
München-Stuttgart	130	132	139	149	142	160	163	157	149	207	196	197
Frankfurt-Köln	107	109	111	121	113	130	128	114	123	167	154	161
Köln-Frankfurt	111	110	111	124	114	133	129	115	125	170	156	165
Stuttgart-Karlsruhe	59	54	56	64	57	69	67	63	65	93	82	89
Karlsruhe-Stuttgart	58	55	56	65	57	70	67	62	65	95	81	89
Köln-Dortmund	66	63	63	73	64	79	73	69	78	105	89	97
Dortmund-Köln	67	62	66	72	67	76	76	69	81	99	91	101
Leipzig-Dresden	76	77	77	85	78	94	91	89	89	117	110	114
Dresden-Leipzig	72	76	76	85	78	95	90	87	89	121	108	116
Villingen-Sigmaringen	61	61	62	65	62	71	70	65	67	84	75	72
Sigmaringen-Villingen	63	63	63	67	63	74	72	66	68	87	78	74
Gießen-Herborn	27	29	24	31	25	34	29	28	30	42	35	38
Herborn-Gießen	26	26	26	29	26	31	30	30	31	40	37	36
Erding-Ebersberg	27	26	26	29	26	31	30	26	31	38	32	34
Ebersberg-Erding	28	26	26	29	26	31	30	28	32	39	32	35
Mittelwert über alle Relationen	69,6	68,8	70,1	77,4	71,2	83,5	81,6	76,7	79,9	106,5	96,9	101,6

Tab. 3-6: Vergleich der mittleren Fahrtzeiten [min] eines Tages (04:00 bis 22:00 Uhr) für verschiedene Fahrtzeitausprägungen. Die mittlere Fahrtzeit des Tages ergibt sich zeitgewichtet aus den Stundenwerten.

Tabelle 3-6 zeigt die mittleren Fahrtzeiten eines Tages für verschiedene Datenquellen und Fahrtzeitausprägungen. Man kann für die 16 ausgewählten Relationen folgende Aussage treffen:

$$t_{Google}^{Opt} \approx t_{HERE}^{P50} \approx t_{TomTom}^{P50} \approx t_{HERE}^{Mean} < t_{Google}^{Best} \approx t_{INRIX} \approx t_{TomTom}^{Mean} \\ < t_{HERE}^{P75} < t_{TomTom}^{P75} < t_{HERE}^{P90} < t_{Google}^{Pessimistic} \approx t_{TomTom}^{P90}$$

Werden die Fahrtzeitdaten einer Datenquelle zur Ermittlung von Verlustzeiten genutzt (Soll-Fahrtzeit und Ist-Fahrtzeit aus einer Quelle), dann ergeben sich die in Tabelle 3-7 zeigen Werte. Es ist offensichtlich, dass die Verlustzeiten maßgeblich von der Datenquelle und der Wahl der Soll-Fahrtzeit abhängen. In der letzten Zeile der Tabelle werden die Verlustzeiten in jährliche Verlustzeitstunden umgerechnet. Dabei wird angenommen, dass die gesamte jährliche Pkw-Fahrleistung einer Person in Deutsch-

land, die im Mittel etwa 11.000 km beträgt, auf den ausgewählten Relationen stattfindet. Je nach Wahl der Fahrtzeiten ergeben sich Verlustzeiten von 10 bis 47 Stunden. Nachfragegewichtete Verlustzeiten führen zu höheren Werten.

	Google			INRIX	TomTom		HERE	
$t_1^{Curr}$	$t_{Google}^{Best}$	$t_{Google}^{Best}$	$t_{Google}^{Pessimistic}$	$t_{INRIX}^{Best}$	$t_{TomTom}^{Mean}$	$t_{TomTom}^{Mean}$	$t_{HERE}^{Mean}$	$t_{HERE}^{Mean}$
$t^{Target}$	$t_{Google}^{Opt}$	$t_{Google}^{Best}$	$t_{Google}^{Best}$	$t_{INRIX}^{Best}$	$t_{TomTom}^{P50}$	$t_{TomTom}^{P50}$	$t_{HERE}^{P50}$	$t_{HERE}^{P50}$
Gewichtung	Zeit	Zeit	Zeit	Zeit	Zeit	Nachfrage	Zeit	Nachfrage
Stuttgart-München	8	4	18	4	7	7	3	3
München-Stuttgart	7	3	15	3	7	8	3	3
Frankfurt-Köln	7	2	14	3	6	6	2	2
Köln-Frankfurt	6	2	14	2	6	6	2	2
Stuttgart-Karlsruhe	9	7	25	7	12	14	4	5
Karlsruhe-Stuttgart	12	8	27	7	13	15	5	6
Köln-Dortmund	10	4	16	5	9	10	4	4
Dortmund-Köln	11	5	18	4	8	9	3	3
Leipzig-Dresden	9	4	16	4	8	8	3	3
Dresden-Leipzig	10	3	18	2	7	8	2	2
Villingen-Sigmaringen	7	5	9	5	8	9	4	4
Sigmaringen-Villingen	8	5	9	4	9	10	5	5
Gießen-Herborn	7	3	15	4	7	8	3	3
Herborn-Gießen	9	2	11	3	7	8	2	2
Erding-Ebersberg	9	5	9	4	9	10	4	4
Ebersberg-Erding	10	7	13	7	11	13	3	4
Mittelwert über alle Relationen	8,7	4,3	15,5	4,2	8,3	9,3	3,2	3,6
Jährliche Verlustzeit-Stunden einer Person pro Jahr bei einer Pkw-Fahrleistung von 11.000 km	26,6	13,1	47,3	12,7	25,5	28,4	9,9	10,9

Tab. 3-7: Vergleich der mittleren Verlustzeiten pro Kilometer [s/km] über einen Tag (04:00 bis 22:00 Uhr) für verschiedene Ausprägungen der Soll-Fahrtzeit und der Ist-Fahrtzeit

### 3.4.3 Paarweiser Vergleich der Abweichungen

Bild 3-20 zeigt einen paarweisen Vergleich der Fahrtzeiten aller Datenanbieter für die 16 Testrelationen. Für den Vergleich wird wieder der GEH herangezogen. Zwischen HERE und TomTom wurde der GEH-Wert über alle Perzentile von 5 % bis 95 % in 5%-Schritten ermittelt. Bei den GEH-Werten zwischen Google und TomTom und zwischen Google und HERE wurden die Google-Werte einmal mit den 25%-Perzentilen einmal mit dem Median vergli-

chen, da Google keine Perzentile zur Verfügung stellt. In Bild 3-21 sind die gleichen Daten mit einer Fokussierung auf dem Vergleich zwischen den Datenanbietern dargestellt. In Tabelle 3-8 ist der mittlere GEH-Wert über alle Relationen dargestellt.

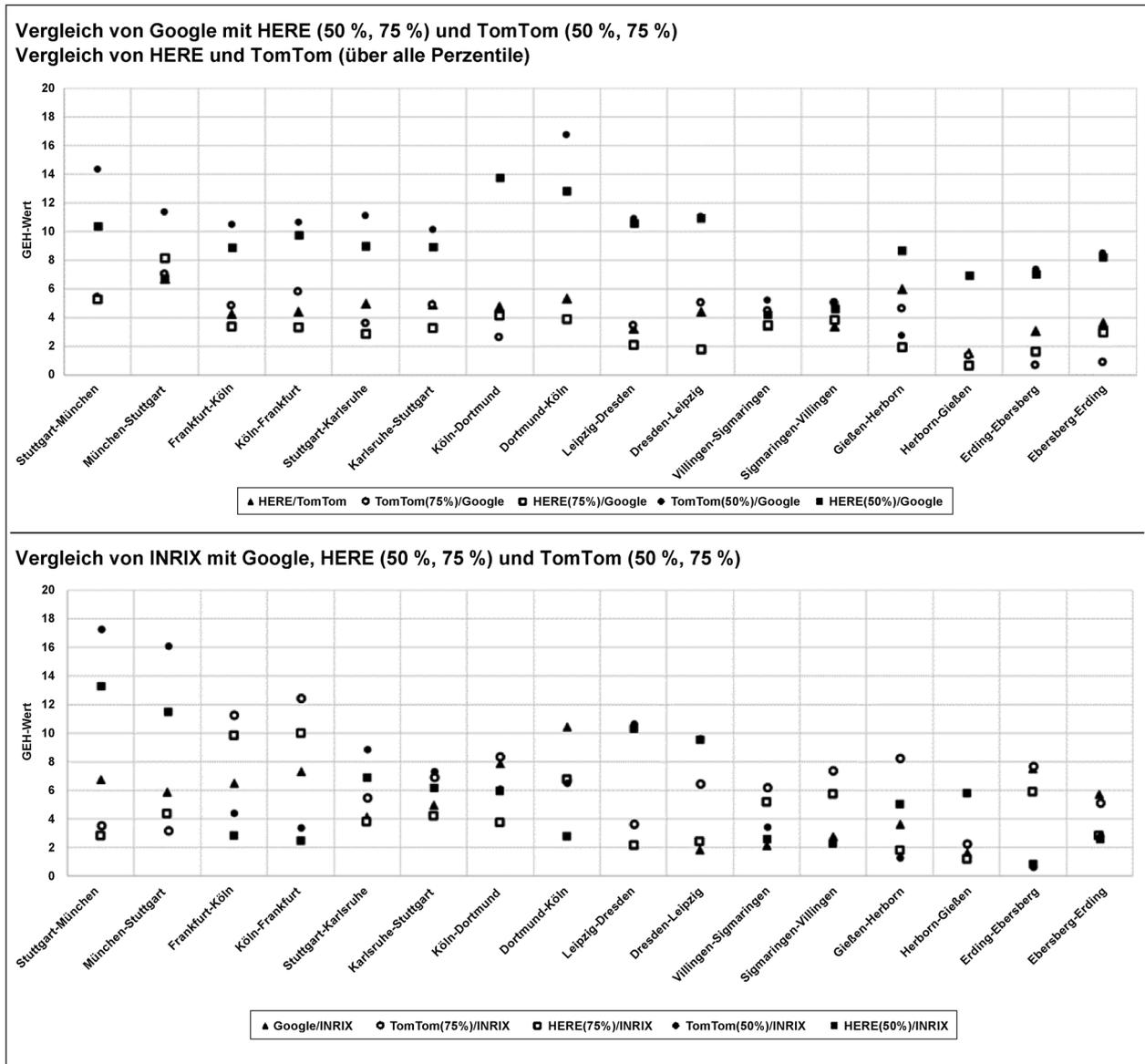


Bild 3-20: Paarweiser Vergleich der Fahrtzeiten der Datenanbieter für die 16 Relationen mit dem GEH-Wert differenziert nach Relationen

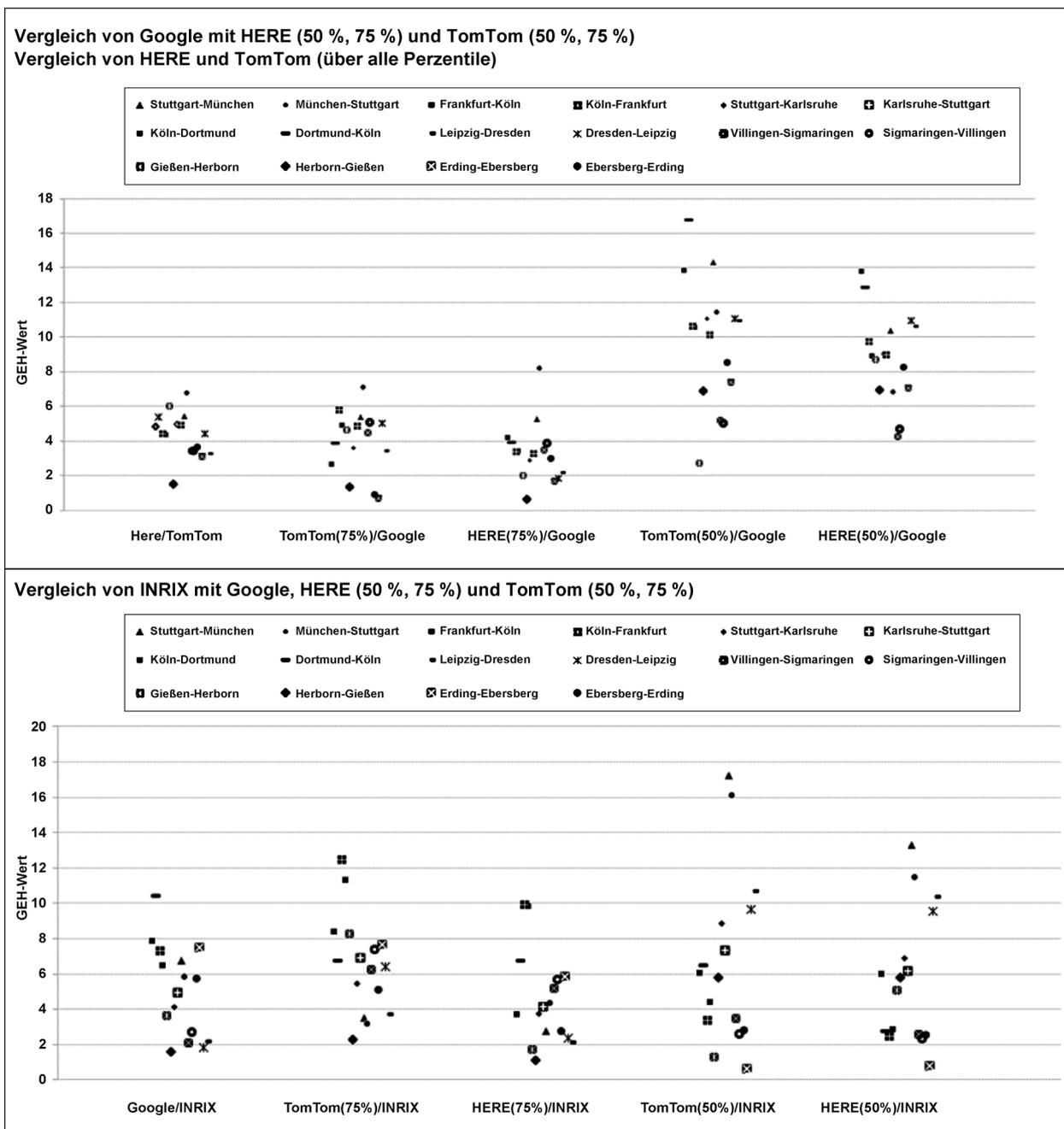


Bild 3-21: Paarweiser Vergleich der Fahrtzeiten der Datenanbieter für die 16 Relationen mit dem GEH-Wert differenziert nach Anbieter-Paaren

HERE/ TomTom	TomTom (75%)/ Google	TomTom (50%)/ Google	HERE (75%)/ Google	HERE (50%)/ Google	Google/ INRIX	TomTom (75%)/ INRIX	TomTom (50%)/ INRIX	HERE (75%)/ INRIX	HERE (50%)/ INRIX
4,4	4,0	9,8	3,3	8,9	5,1	6,6	6,7	4,5	5,7

Tab. 3-8: Mittlere GEH-Werte über alle Relationen für den paarweisen Vergleich der Fahrtzeiten der Datenanbieter

Der Vergleich der Datenquellen für die 16 Relationen erlaubt folgende Aussagen:

- Vergleich Google-Best-Guess und INRIX:  
Die vorhergesagten Fahrtzeiten der Anbieter Google und INRIX weisen im Mittel eine gute Übereinstimmung auf. Die GEH-Werte liegen im Mittel über alle Relationen bei 5,1 und schwanken zwischen 1,8 (Herborn – Gießen) und 10,3 (Dortmund – Köln). Die Schwankungen sind damit größer als bei den Vergleichen von HERE mit TomTom, Google mit HERE (75 %) und Google mit TomTom (75 %).
- Vergleich HERE und TomTom:  
Die Fahrtzeiten der Anbieter HERE und TomTom weisen über alle Perzentile eine gute Übereinstimmung auf. Die GEH-Werte liegen im Mittel über alle Relationen bei 4,4 und schwanken zwischen 1,5 (Herborn – Gießen) und 6,7 (München – Stuttgart).
- Vergleich Google-Best-Guess mit HERE und TomTom:  
Die Google-Fahrtzeiten liegen näher am 75%-Perzentil von HERE und TomTom als am Median. Dies lässt vermuten, dass bei der internen Datenaufbereitung bei Google nicht der Median, sondern ein höheres Perzentil verwendet wird.
- Vergleich INRIX mit HERE und TomTom:  
Die INRIX-Fahrtzeiten liegen ebenfalls näher am 75%-Perzentil von HERE und TomTom als am Median. Die Schwankungen beim Vergleich von INRIX mit HERE und TomTom liegen höher als beim Vergleich von Google.
- Vergleich von FCD mit Verkehrsnachfragemodell:  
Das Verkehrsnachfragemodell liefert im belasteten Zustand Fahrtzeiten, die am besten mit den 90%-Perzentilen der FCD in der Hauptverkehrszeit übereinstimmen. Im unbelasteten Zustand stimmen die Fahrtzeiten am besten mit dem Median der FCD in der Nebenverkehrszeit überein.
- Einfluss der Länge:  
Generell ergeben sich bei längeren Relationen größere GEH-Werte als bei kürzeren Relationen.

- Stichprobengröße:  
Die durchschnittliche Stichprobengröße einer Strecke der Testrelationen liegt bei TomTom mit 37.400 Beobachtungen etwa 2,5-mal höher als bei HERE mit 14.200 Beobachtungen.
- Eine Analyse der einzelnen Geschwindigkeitswerte pro Streckenabschnitt zeigt, dass bei einer zeitlich differenzierten Betrachtung (Stundenwerte eines Kalendertages) die HERE-Daten teilweise unplausible Werte aufweisen. Dies ist vermutlich auf die geringe Stichprobe und die daraus resultierende Invarianz zurückzuführen. Bei einer Verwendung der HERE-Daten ist daher auf eine ausreichende Stichprobe zu achten und im Zweifelsfall die Stichprobe durch Hinzunahme weiterer Tage/Zeitbereiche zu vergrößern.

### 3.5 Fazit der Analyse

Die Anbieter liefern Fahrtzeitdaten in unterschiedlichen Ausprägungen. Während TomTom und HERE den Mittelwert und Perzentile ausweisen, liefert INRIX einen (Speed Optimized Estimate) und Google drei Vorhersagewerte (Best-Guess, Optimistic, Pessimistic). Der Vergleich der Datenquellen zeigt für die Stichprobe der 16 Relationen Folgendes:

- Die Google-Best-Guess-Fahrtzeiten und die INRIX-Fahrtzeiten liegen näher am 75%-Perzentil von HERE und TomTom als am Median. Dies lässt vermuten, dass bei der internen Datenaufbereitung bei Google und INRIX nicht der Median, sondern ein höheres Perzentil verwendet wird:

$$t_{HERE}^{P50} \approx t_{TomTom}^{P50} < t_{Google}^{Best} \approx t_{INRIX} < t_{HERE}^{P75} < t_{TomTom}^{P75}$$

- Während der Median bei TomTom und HERE ähnliche Werte aufweist, liefern der Mittelwert und Perzentile > 50 % bei TomTom längere Fahrtzeiten als bei HERE:

$$t_{HERE}^{P50} \approx t_{TomTom}^{P50} \text{ und } t_{HERE}^{Mean} < t_{TomTom}^{Mean} \text{ und } t_{HERE}^{P75} < t_{TomTom}^{P75}$$

- Die Google-Optimistic-Fahrtzeiten entsprechen in etwa dem Median von TomTom und HERE:

$$t_{HERE}^{P50} \approx t_{TomTom}^{P50} \approx t_{Google}^{Opt}$$

- Das Verkehrsnachfragemodell liefert im belasteten Zustand Fahrtzeiten, die am besten mit den 90%-Perzentilen der FCD in der Hauptverkehrszeit übereinstimmen. Im unbelasteten Zustand stimmen die Fahrtzeiten am besten mit dem Median der FCD in der Nebenverkehrszeit überein.
- Werden die Fahrtzeitdaten einer Datenquelle zur Ermittlung von Verlustzeiten genutzt (Soll-Fahrtzeit und Ist-Fahrtzeit aus einer Quelle), dann können sich deutlich unterschiedliche Werte zwischen den Datenquellen ergeben.

Voraussetzung für eine Zuverlässigkeitsanalyse ist die Einbeziehung der Fahrtzeitverteilung je Strecke durch die Perzentile. Hierfür bieten nur HERE und TomTom die erforderlichen Inputdaten. Um Fahrtzeitverteilungen aus Perzentilen der Geschwindigkeit abzuleiten, sind allerdings zeitlich und räumlich aufgelöste Geschwindigkeitsdaten erforderlich. Aus diesen Daten müssen dann, wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, Trajektorien generiert werden. Für Anwendungen in der Praxis ist diese Vorgehensweise aus zwei Gründen schwer umsetzbar: Aufgelöste Daten sind teuer und der Aufbereitungsprozess ist aufwändig.

Bei der Verwendung von Google kann die Fahrtzeitausprägung „Pessimistic“ ein nicht näher spezifiziertes Perzentil bieten.

Für die Ermittlung von realitätsnahen Verlustzeiten (Stauzeiten) und Verlustzeitkosten (Staukosten) müssen mittlere Fahrtzeiten verwendet werden, idealerweise gewichtet mit der Zahl der Fahrzeuge. Eine mittlere Fahrtzeit liefert Google nicht. Unregelmäßige Störungen, wie sie am Erhebungstag zwischen Karlsruhe und Stuttgart beobachtet wurden, werden die „Best-Guess“-Fahrtzeit bei Google nicht beeinflussen. Bei HERE, INRIX und TomTom müssten derartige Störungen die mittlere Fahrtzeit beeinflussen und mit der Zahl der Beobachtungen (Stichprobengröße) gewichtet werden.

Werden die Fahrtzeitdaten einer Datenquelle zur Ermittlung von Verlustzeiten genutzt (Soll-Fahrtzeit und Ist-Fahrtzeit aus einer Quelle), dann können sich deutlich unterschiedliche Werte zwischen den Datenquellen ergeben.

## 4 Anforderungen an die Datenbasis

Ein wesentliches Ziel des Projektes ist die Erstellung einer allgemein zugänglichen Datenbasis, die verbindungsbezogene Fahrt- und Reisezeiten zwischen zentralen Orten (Metropolregionen, Oberzentren, Mittelzentren) bereitstellt. Dazu werden in diesem Kapitel zuerst die Einsatzbereiche und die Anforderungen an die Datenbasis formuliert und die Auswahl der Datenquellen dokumentiert. Dann werden die Struktur der Datenbasis und die Vorgehensweise zur Auswahl der Relationen beschrieben.

### 4.1 Einsatzbereiche und Anforderungen

Die Datenbasis soll für folgende Einsatzbereiche genutzt werden:

- Validierung von Verkehrsnachfragemodellen: Die Ersteller von Verkehrsnachfragemodellen sollen mit der Datenbasis modellierte Fahrtzeiten für verschiedene Netzzustände (unbelastet, belastet) validieren können.
- Vergleich mit Zeitdaten anderer Datenquellen: Die Datenbasis soll einen Vergleich von Fahrtzeitdaten aus anderen Datenquellen (Messfahrten, Daten anderer Anbieter, Mobilfunkdaten, Verkehrsmodelle) ermöglichen. Dieser Vergleich ist u. a. für eine Analyse der verbindungsbezogenen Angebotsqualität nach den RIN erforderlich, da die Ausprägung der RIN-Bewertungskurven von den Fahrtzeiten der Datenquelle beeinflusst werden, die für die Schätzung der Kurven genutzt werden.
- Ermittlung von Referenzkurven für die RIN: Auf Grundlage der erstellten Datenbasis sollen Referenzkurven zur Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität für die RIN erstellt werden (siehe Kapitel 7).

Die Datenbasis soll folgende Anforderungen erfüllen:

- Sie soll Zeiten für Relationen zwischen zentralen Orten der Verbindungsfunktionsstufen 0 bis III umfassen. Die Relationen sollen alle Entfernungsbereiche zwischen 0 und 500 Kilometern abdecken.

- Sie soll Zeiten für einen typischen Werktag bereitstellen.
- Sie soll Zeiten für die typischen Verkehrszeiten eines Tages (SVZ, NVZ, mHVZ, aHVZ) bereitstellen.
- Sie soll Zeiten für Zustände ohne und mit Störungen bereitstellen.
- Sie soll Zeiten für Pkw und Lkw bereitstellen.
- Die Daten sollen von Dritten ohne besonderen Nutzungsvertrag genutzt werden können.

## 4.2 Auswahl der Datenquellen

Die Auswahl der Datenquellen erfolgte in Abstimmung mit dem Betreuerkreis aufbauend auf den Ergebnissen der in Kapitel 3 beschriebenen Analyse mehrere Datenquellen. Es wurden folgende Datenquellen ausgewählt:

- Datenquelle Verkehrsnachfragemodell:  
Für die Untersuchung wurde das deutschlandweite Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate genutzt. Für Relationen mit Quelle und Ziel in Bayern wurde zusätzlich das Landesverkehrsmodell Bayern eingesetzt.
- Datenquelle streckenbezogene FCD:  
Es wurden FCD des Datenanbieters TomTom genutzt. In diesem Projekt konnten deutschlandweite Geschwindigkeitsdaten für vier Ein-Stunden-Zeiträume eines mittleren Werktags genutzt werden. Die Datengrundlagen sind in Kapitel 5.1.2 beschrieben. Ein Grund für die Auswahl von TomTom als Datenanbieter war die Verfügbarkeit von Geschwindigkeitsperzentilen und die damit verbundene Möglichkeit, Aussagen zu Zuständen mit und ohne Störungen machen zu können. Dabei gelten die in Tabelle 5-4 beschriebenen Einschränkungen zur Aussagekraft von Fahrzeitdaten aus Perzentilwerten.
- Relationsbasierte Ansätze mit FCD:  
Es wurden Fahrzeitdaten des Datenanbieter Google genutzt. Hier konnten Fahrzeiten für mehrere Zeitpunkte und mehrere Verkehrstage abgefragt werden. Die Datengrundlagen sind in Kapitel 5.2.1 beschrieben.

## 4.3 Struktur der Datenbasis

Tabelle 4-1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Datensatzes. Eine genauere Beschreibung findet sich in Anlage 3. Für jede Relation werden folgende Fahrzeitausprägungen bereitgestellt:

- Datenquelle Verkehrsnachfragemodell:
  - Fahrzeit unbelastet und belastet
  - Modus Pkw
- Datenquelle streckenbezogene FCD (TomTom):
  - Fahrzeiten für 4 Tageszeiten (07:00, 10:00, 17:00, 20:00)
  - Perzentile 50 %, 75 % und 90 %, sowie Mittelwert
  - Modus Pkw und Lkw
- Datenquelle relationsbezogene FCD (Google):
  - Fahrzeiten für 9 Tageszeiten (04:00, 06:00, 07:00, 08:00, 10:00, 14:00, 17:00, 18:00, 20:00)
  - Zustände Best-Guess, Pessimistic und Optimistic
  - Modus Pkw

Die finale Datenbasis enthält weitere Fahrzeitdaten, die in Anlage 3 beschrieben sind. Die Daten werden im Format CSV (Microsoft Excel) bereitgestellt.

Bezeichner	Beschreibung	Datenformat	Beispiel	Ausprägung
Startort	Name Startort	String	Stuttgart	
Zielort	Name Zielort	String	Karlsruhe	
Startort (AGS)	Startort (Gemeindeschlüssel)	Ganzzahl	9162000	
Zielort (AGS)	Zielort (Gemeindeschlüssel)	Ganzzahl	8111000	
Startort (Koordinate)	Startort (Koordinate)	WGS 84	54.7941,9.44703	
Zielort (Koordinate)	Zielort (Koordinate)	(EPSG 4326)	54.32329,10.12283	
LLW	Luftlinienentfernung [m]	Ganzzahl	99	DQ = T
tZu	Zugangszeit [min]	Gleitkommazahl	2,5	aus RIN
tAb	Abgangszeit [min]	Gleitkommazahl	2,5	aus RIN
tPS	Parksuchzeit [min]	Gleitkommazahl	1,0	aus RIN
tUN	Fahrtzeit im untergeordneten Netz [min]	Gleitkommazahl	1,0	aus RIN
DQ_L_R_(X)	Fahrtweite für Functional-Road-Class X [km] • X = FRC 0 – 7 (siehe Tabelle 5-1)	Ganzzahl	99	DQ = T
DQ_FZ (M,hhmm,PP)	Fahrtzeit Modus M • P Pkw • L Lkw (nur DQ1) im Zeitraum hhmm für Fahrzeitausprägung PP	Ganzzahl	99	DQ1 = T DQ2 = G DQ3 = V DQ4 = B Zeitraum 1: SVZ 20:00 Zeitraum 2: mHVZ 07:00 Zeitraum 3: aHVZ 17:00 Zeitraum 4: NVZ 10:00 DQ1-PP1 = 50 (Perzentil) DQ1-PP2 = 75 (Perzentil) DQ1-PP3 = 90 (Perzentil) DQ1-PP4 = Mean (Mittelwert) DQ2-PP1 = Best-Guess DQ2-PP2 = Pessimistic DQ2-PP3 = Optimistic DQ3-1 = Fahrtzeit Netz unbelastet DQ3-2 = Fahrtzeit Netz belastet
DQ_FZ_Soll (M,hhmm,PP,vzul)	Soll Fahrtzeit (mit und ohne Berücksichtigung der zulässigen Geschwindigkeit) (bei DQ1 Pkw und Lkw)	Ganzzahl	99	DQ1 = Median SVZ DQ1 = 15%-Perzentil SVZ DQ1 = Freifahrtgeschwindigkeit DQ2 = G Fahrtzeit SVZ DQ3 = V Fahrtzeit Netz unbelastet

#### Legende

DQ Prefix zur Bezeichnung der Datenquelle:

- V Verkehrsnachfragemodell Validate
- B Landesverkehrsmodell Bayern
- G Google
- T TomTom

t Bezeichnung einer Zeitvariablen in Minuten

- tFZ Fahrtzeit
- tZu Zugangszeit
- tAb Abgangszeit
- tPS Parksuchzeit

vzul • wenn Datensatzkennung „vzul“ enthält, dann wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit berücksichtigt

Tab. 4-1: Aufbau und Inhalte eines Datensatzes

## 4.4 Auswahl der Relationen

### 4.4.1 Vorgehensweise

Für die Auswahl der zu untersuchenden Relationen werden zunächst Luftliniennetze zu den Verbindungsfunktionsstufen (siehe Kapitel 2.2.2) erstellt. Hierfür werden in einem ersten Schritt Dreiecksnetze mit einer Delaunay-Triangulierung aufgebaut. Über die Delaunay Triangulation werden die Nachbarschaftsgrade der Verbindungsfunktionsstufen bestimmt. Dies geschieht durch die Generierung eines Dreiecksnetzes aus gegebenen Punkten und ihrer zugehörigen Koordinaten. Dabei dürfen innerhalb eines Umkreises eines Dreiecks keine weiteren Punkte liegen. Somit werden die Orte derart verbunden, dass sich keine Verbindungslinien überschneiden. SCHLEUPEN (2004)

Die zentralen Orte einer Zentralitätsstufe werden somit mit benachbarten Orten derselben Zentralitätsstufe verbunden. Durch diese Darstellung ist nun die Ermittlung der Nachbarschaftsgrade möglich. Die Nachbarschaftsbeziehung der Orte wird durch die Kanten des Dreiecksnetzes dargestellt. Die Anzahl an Kanten, über die von einem Ort bis zum jeweiligen gewünschten Ort gegangen werden muss, repräsentiert den Nachbarschaftsgrad der zwei Orte.

Die Vorgehensweise zur Erstellung der Luftliniennetze erfolgt entsprechend der Methode im Anhang der RIN (2008).

Dieses Vorgehen führt zu den unten dargestellten Luftliniennetzen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Dargestellt sind hier lediglich die Dreiecksnetze ohne Abbildung der Nachbarschaftsgrade. Jede der Verbindungen ist symmetrisch d. h. es existiert für jede Richtung eine Luftlinienverbindung (Zentrum i nach Zentrum j und Zentrum j nach Zentrum i).

Ziel ist es, Relationen auszuwählen, bei denen sowohl Quelle und Ziel als auch die komplette Route in Deutschland liegt. Für die Auswahl werden größtenteils Relationen mit Luftlinienentfernungen zwischen 5 km und 500 km gewählt. Dies geschieht, da in den Bewertungsfunktionen der RIN lediglich dieser Entfernungsbereich abgedeckt ist. Des Weiteren werden bei der Festlegung der Relationen die Staatsgrenzen berücksichtigt, Grenzen von Bundesländern jedoch nicht, da laut RIN die Versorgungsfunktion innerhalb des Staatsgebietes erfolgen muss.

Zur Identifizierung dieser Relationen müssen im Netz folgende Fälle berücksichtigt werden:

- Fall 1: Randrelationen
- Fall 2: Route führt über Ausland

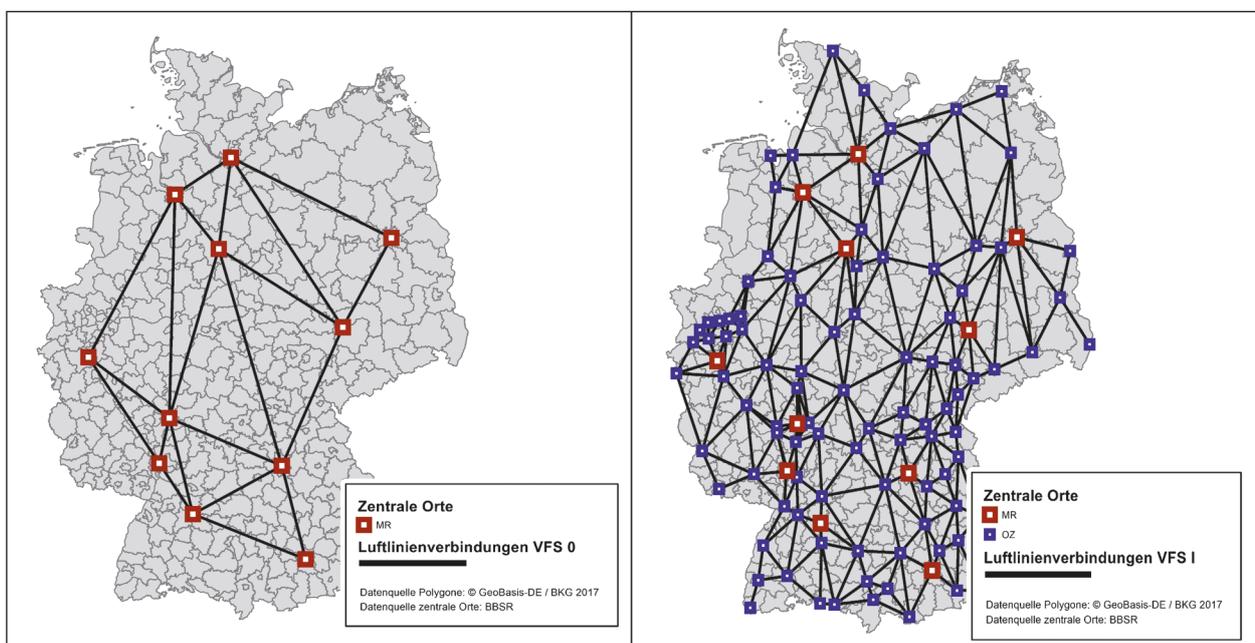


Bild 4-1: Relationen der Verbindungsfunktionsstufe 0 für Nachbarschaftsgrad 1 (Bild links); Relationen der Verbindungsfunktionsstufe I für Nachbarschaftsgrad 1 (Bild rechts).

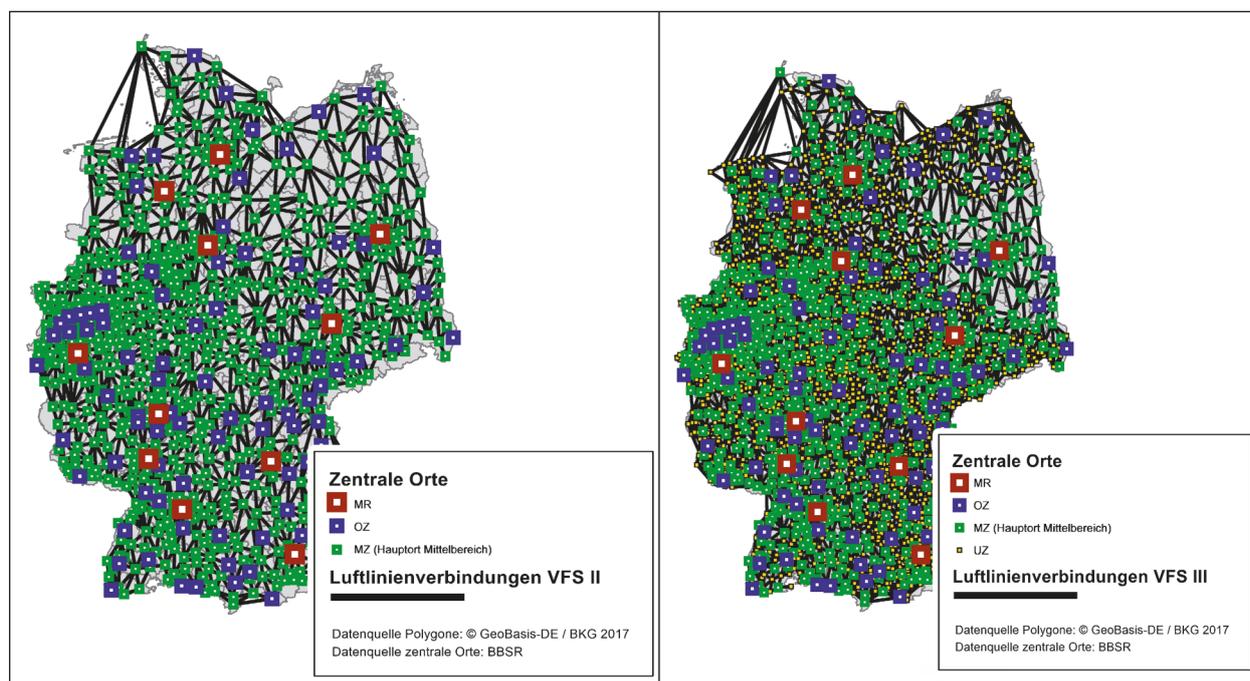


Bild 4-2: Relationen der Verbindungsfunktionsstufe II für Nachbarschaftsgrad 1 (Bild links); Relationen der Verbindungsfunktionsstufe III für Nachbarschaftsgrad 1 (Bild rechts).

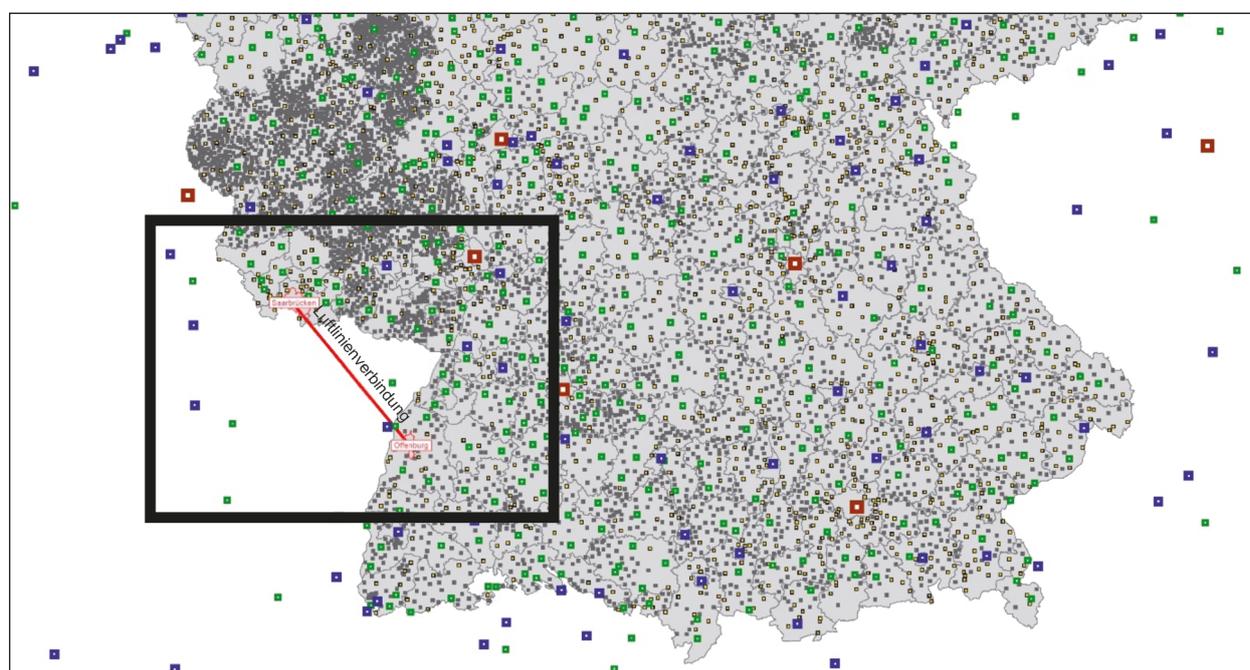


Bild 4-3: Beispielrelation mit Luftlinienverbindung über Ausland

### Randrelationen

Randrelationen sind Relationen, deren Luftlinienverbindung größtenteils über das Ausland führt. In Bild 4-3 ist eine Randrelation beispielhaft dargestellt.

Um Randrelationen auszuschließen, werden zentrale Orte aus dem Ausland bei der Erstellung der Luftliniennetze mit einbezogen. Dadurch werden den Orten, die nahe an der Grenze liegen, weitere Orte zur Verfügung gestellt, mit denen sie ein Dreiecksnetz aufbauen können. Durch das anschlie-

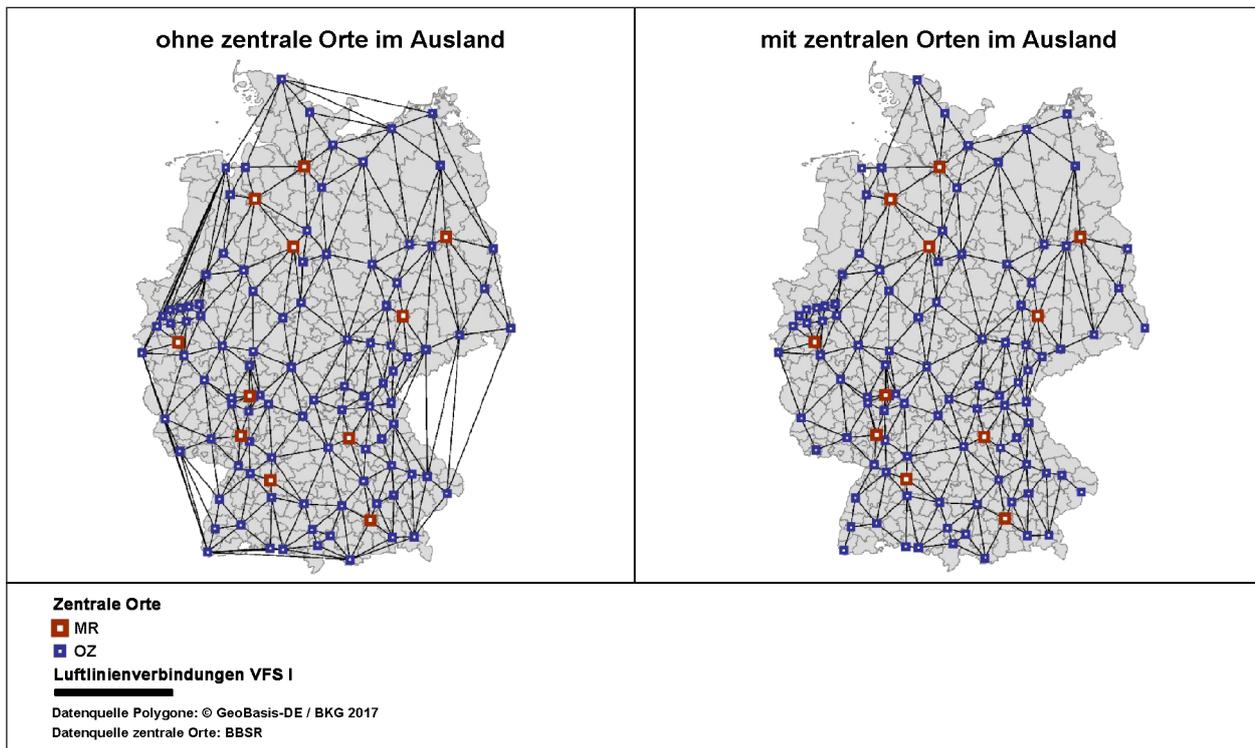


Bild 4-4: Verbindungsfunktionsstufe I mit Nachbarschaftsgrad 1 ohne Berücksichtigung der zentralen Orte im Ausland (links) und mit Berücksichtigung der zentralen Orte im Ausland (rechts).

ßende Kriterium, dass nur Relationen ausgewählt werden, deren Quelle und Ziel in Deutschland liegen, werden diese Relationen anschließend herausgenommen. In Bild 4-4 ist links das Gebiet der Bundesrepublik der Verbindungsfunktionsstufe I mit dem Nachbarschaftsgrad 1 ohne zentrale Orte aus dem Ausland dargestellt. Rechts hingegen sind die zentralen Orte aus dem Ausland mitberücksichtigt. Im rechten Netz sind für diese Verbindungsfunktionsstufe deutlich weniger Randrelationen enthalten als im linken Netz. Somit wird ein großer Anteil der Randrelationen für alle Verbindungsfunktionsstufen herausgefiltert. Die geringe Anzahl an Randrelationen, die auch nach dem beschriebenen Vorgehen im Netz verbleiben, werden händisch entfernt.

### Route führt über Ausland

Im Fall 2 werden alle Relationen, deren Route im Netz über das Ausland verläuft, identifiziert und herausgenommen. Die Luftlinienverbindung kann hierbei komplett in der Bundesrepublik Deutschland liegen. Es wird lediglich die Route und nicht die Luftlinienverbindung betrachtet. In Bild 4-5 ist der Fall verdeutlicht, indem die Luftlinienverbindung komplett in Deutschland liegt, die Route jedoch teilweise im Ausland. Zur Identifizierung solcher Rela-

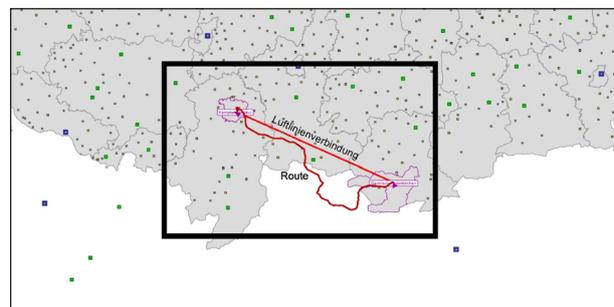


Bild 4-5: Beispielrelation mit Route über Ausland

tionen werden zu allen Relationen bis zum Nachbarschaftsgrad 3 Routen erzeugt. Die Auswahl der Route erfolgt nach dem in Kapitel 4.5 genannten Vorgehen. Aus den erstellten Routen werden in kurzen Abständen Koordinatenpunkte des Routenverlaufs erzeugt. Diese Menge von Koordinatenpunkten repräsentiert die jeweilige Route. Über die GIS-Funktion „Verschneiden“ werden alle Koordinatenpunkte der Relationen mit der Fläche Deutschlands verschnitten. Liegen nicht alle Koordinatenpunkte einer Route einer Relation in Deutschland, wird die Relation nicht für die Auswertungen betrachtet.

Alle aus Fall 1 und Fall 2 identifizierten Relationen, werden anschließend aus den ausgewählten Relationen herausgenommen und durch weitere Relationen ersetzt.

#### 4.4.2 Auswahl der zentralen Orte

Neben den Zentralitäten in Deutschland ist es für die Grenzregionen notwendig, die Nachbarländer mit einzubeziehen, wodurch eine Kategorisierung in Verbindungsfunktionsstufen für das Straßennetz ermöglicht wird. Es gibt für das benachbarte Ausland keine einheitliche Datenquelle, die die Städte in zentrale Orte unterteilt. Die Einteilung in Metropolregionen, Ober- und Mittelzentren erfolgt auf Grundlage der Kriterien aus Tabelle 4-2.

Im Anschluss an die Einteilung erfolgte eine visuelle Nachkorrektur. Diese fasst nahegelegene Orte hoher Zentralität in einem Ort zusammen. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Ort mit den größten Einwohnerzahlen einen Agglomerationsraum bildet. Dies wird am Beispiel des Agglomerationsraums Paris deutlich. Nach der oben genannten Einteilung besitzt Paris rund 2.200.000 Einwohner, unter Ein-

bezug der umliegenden Städte wohnen im Großraum von Paris rund 12.400.000 Einwohner. Die rund 10.200.000 Einwohner bilden Städte, die nach der Einteilung in Tabelle 4-2 der Zentralität von Oberzentren zugeordnet werden. Aufgrund ihrer Lage sind diese Städte dem Großraum von Paris zuzuordnen. In der Nachkorrektur werden auf Grund ihrer Lage die Insel Korsika, zugehörig zu Frankreich, aus dem Netz herausgenommen. Es wird angenommen, dass das Ober- und Mittelzentrum keinen Einfluss auf die Verbindungsfunktionen der Strecken der Grenzregionen zu Deutschland haben. Die Anzahl der Einwohner pro Stadt wird für jedes Nachbarland bei den jeweiligen Statistischen Ämtern ermittelt. In Tabelle 4-3 ist eine Übersicht über die zentralen Orte im In- und Ausland gegeben. In Bild 4-6 sind die zentralen Orte auf einer Karte veranschaulicht.

Zentralität	Zentralitätsstufe (Verbindungsfunktionsstufe)	Anzahl an Einwohnern		Weitere Merkmale
		Min	Max	
Metropolregion	0	500.000		Besitzt internationalen Flughafen
Oberzentrum	I	50.000	500.000	
Mittelzentrum	II	30.000	50.000	

Tab. 4-2: Zuordnung der ausländischen Städte zu den Zentralitäten auf Grundlage der Einwohnerzahlen

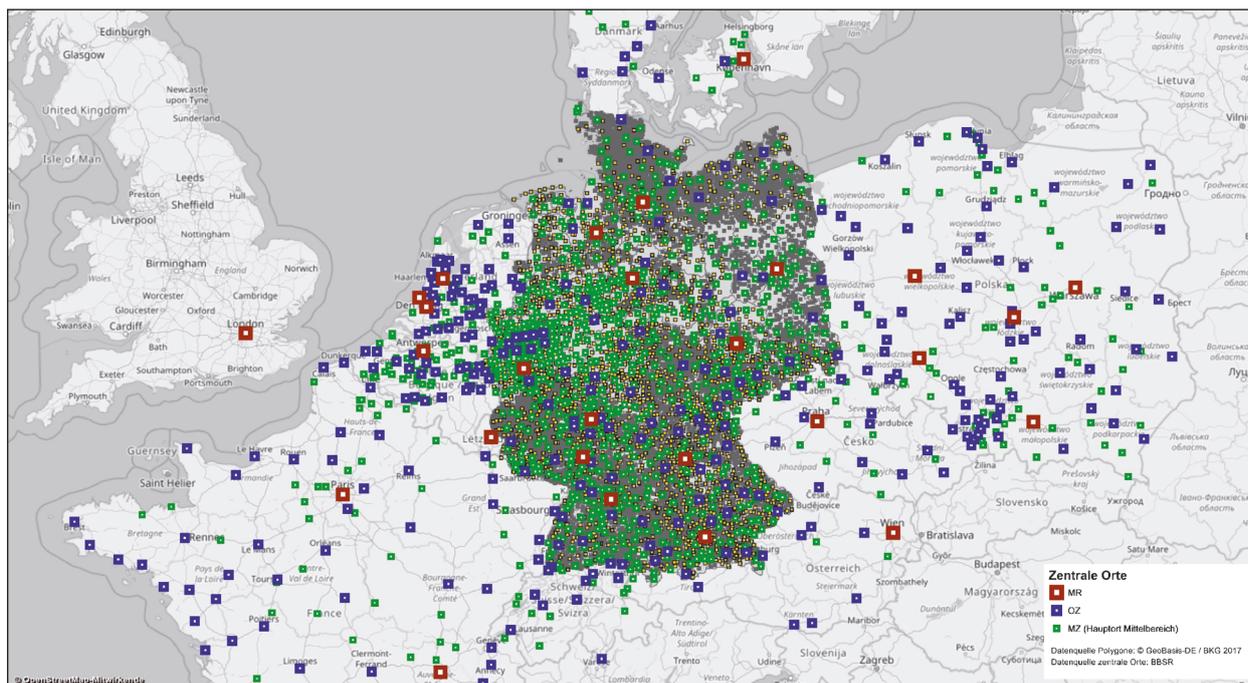


Bild 4-6: Zentrale Orte in Deutschland und im Ausland

	Zentralitätsstufe				
	Stufe 0 Metropolregion	Stufe I Oberzentrum	Stufe II Mittelzentrum	Stufe II Grundzentrum	Stufe IV Gemeinde
Deutschland	11	99	773	2.174	8.035
Ausland	19	237	251	0	0
Gesamt	30	336	1.024	2.174	8.035

Tab. 4-3: Anzahl der zentralen Orte in Deutschland und im Ausland

Zeile	Verbindungs- funktionsstufe (VFS)	Nachbar- schaftsgrad (n)	Entfernungs- bereich [km]	Mittlere Luft- linienentfernung [km]	Anzahl an möglichen Relationen	Ausgewählte Relationen
1	0	1		192	110	110
2	0	2		356		
3	0	3		479		
4	0	> 3		484		
5	I	1		82	1.678	1.618
6	I	2		157		
7	II	1		31	16.020	15.478
8	II	2		56		
9	III	1	5 bis 10	7,7	6.040	988
10	III	1	10 bis 15	12,4	6.032	500
11	I	3	125 bis 500	200	1.306	1.306
12	Von Oberzentren zu Metropolkernen		alle	368	2.178	1.582
Summe				75		21.582

Tab. 4-4: Übersicht über die ausgewählten Relationen

#### 4.4.3 Auswahl der Relationen

Für dieses Projekt werden in Summe 21.582 Relationen ausgewählt. Eine Relation ist die Verbindung von einem Ort A zu einem Ort B. Die Rückrichtung vom Ort B zum Ort A wird als eine eigene Relation definiert. Somit ist z. B. Stuttgart-München eine Relation und München-Stuttgart eine weitere Relation. Tabelle 4-4 gibt eine Übersicht über die ausgewählten Relationen. Dargestellt sind hier die Verbindungsfunktionsstufen differenziert nach Nachbarschaftsgrad, die mittlere Luftlinienentfernung der ausgewählten Relationen und der gewählte Entfernungsbereich. Die Auswahl der Relationen basiert auf folgenden Regeln:

- Zeile 1 bis 8: Für die Verbindungsfunktionsstufen 0 bis II werden alle Relationen entsprechend

den RIN ausgewählt. Nur Relationen, die Strecken im Ausland nutzen, entfallen.

- Zeile 9 und 10: Für die Schätzung der Bewertungsfunktionen ist eine ausreichende Besetzung aller Entfernungsklassen wichtig. Um Fahrtzeiten für ausreichend viele kurze Relationen zu haben, werden aus der Relationsmenge der Verbindungsfunktionsstufe III zufällig Relationen im Entfernungsbereich 5 km bis 10 km und 10 km bis 15 km gezogen.
- Zeile 11: Um Fahrtzeiten für ausreichend viele lange Relationen zu haben, werden aus der Relationsmenge der Verbindungsfunktionsstufe I mit dem Nachbarschaftsgrad 3 zufällig Relationen im Entfernungsbereich 125 km bis 500 km gezogen.

- Zeile 9 bis 11: Die Zahl der Relationen in Zeile 9 bis 11 ergeben sich aus der Vorgabe, dass in der Summe der Zeilen 1 bis 11 20.000 Relationen untersucht werden sollen.
- Zeile 12: Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde abgestimmt, zusätzlich Fahrzeiten für die Relationen von allen Oberzentren zu allen Metropolregionen aufzunehmen.

Bild 4-7 bis Bild 4-9 zeigen die Besetzung der Entfernungsklassen bei einer Klassenbreite von 5 km. In Bild 4-7 ist dargestellt, wie die zusätzlichen Relationen im Nahbereich die Besetzung der Klassen verändern. Bild 4-8 zeigt in gleicher Weise die Ergänzungen im Bereich über 125 km.

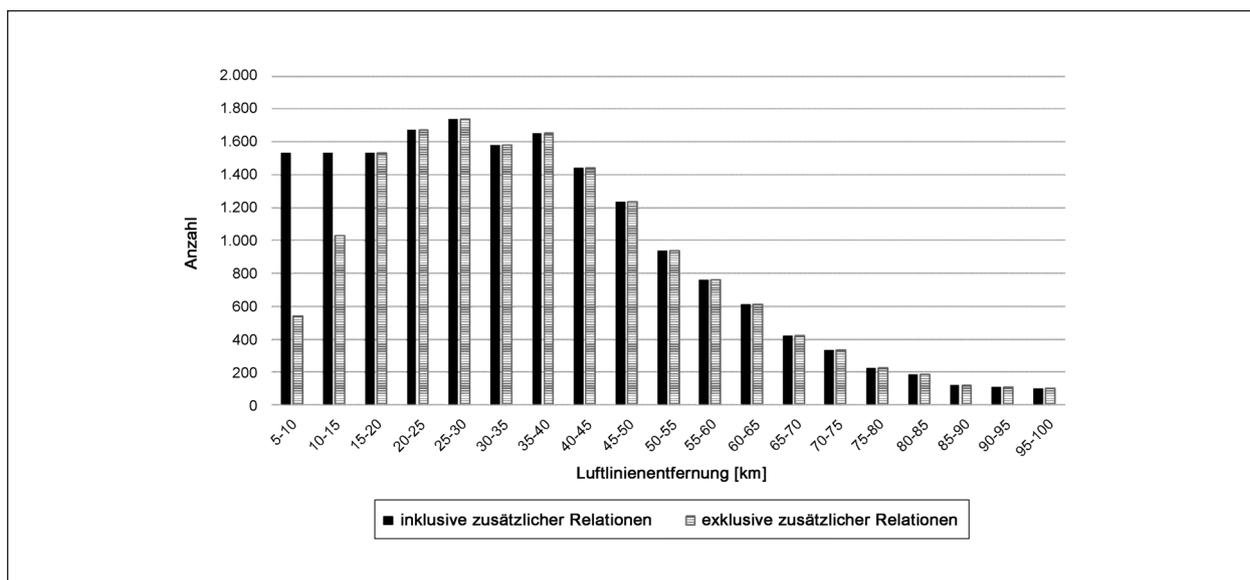


Bild 4-7: Relationen mit einer Luftlinienentfernung zwischen 5 und 100 km

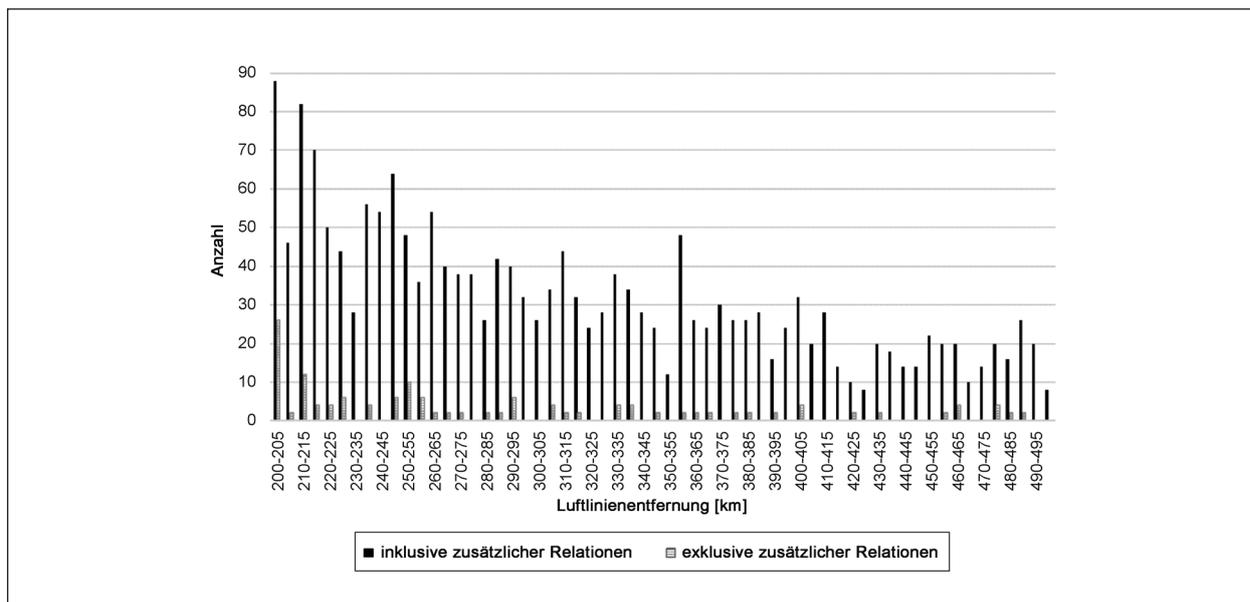


Bild 4-8: Relationen mit einer Luftlinienentfernung zwischen 200 und 500 km

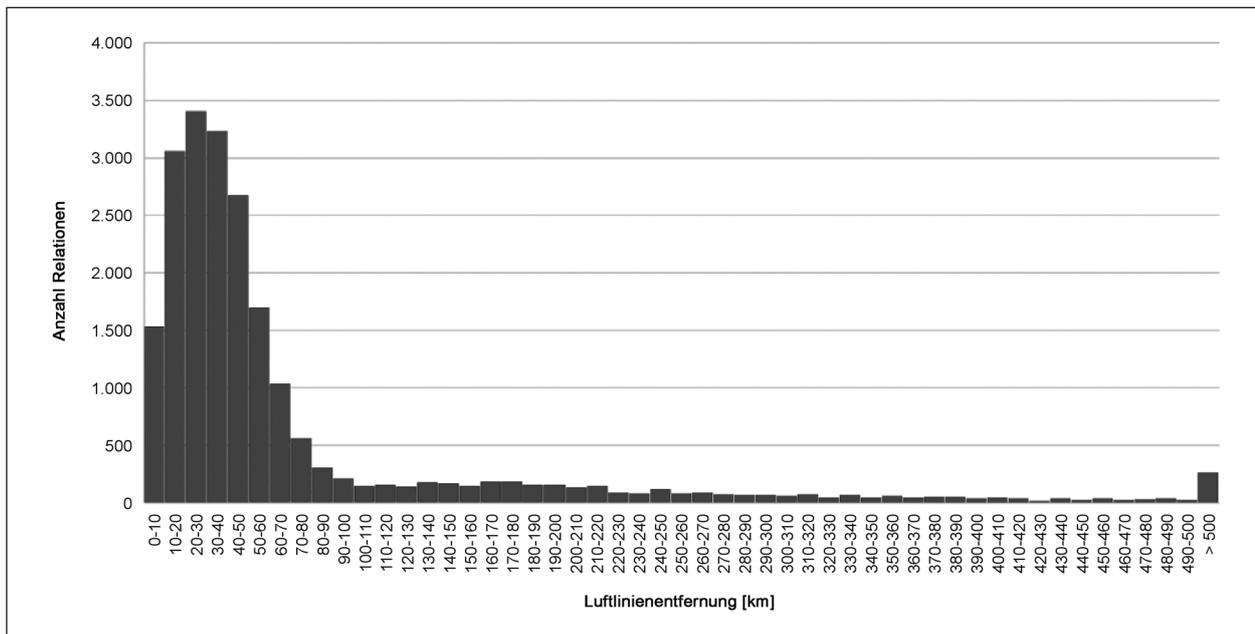


Bild 4-9: Verteilung der Luftlinienentfernung für die ausgewählten Relationen

#### 4.5 Festlegung von Startort, Zielort und Route

Zur Festlegung der exakten Koordinaten der Start- und Zielorte werden diejenigen Koordinatenpunkte gewählt, die Google Maps bei den Routenabfragen ebenfalls wählt. Die in Google Maps verwendeten Daten werden vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) geliefert.

Zur Ermittlung der Route werden zunächst alle Verkehrszellen im Netz auf die ermittelten Koordinatenpunkte gelegt und an das Verkehrsnetz angebunden. Als nächstes wird unter Berücksichtigung der Anbindungszeit die zeit kürzeste Route in der Schwachverkehrszeit ermittelt. Dieses Vorgehen wird für alle der gewählten Relationen wiederholt. Diese ermittelten Routen werden auch für die Ermittlung der Fahr- und Reisezeiten in der Nebenverkehrszeit und der Hauptverkehrszeit verwendet. Über die exakte Länge der Route (nicht der Luftlinienentfernung) kann eine abweichende Routenwahl identifiziert werden.

### 5 Aufbau der Datenbasis

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zum Aufbau der Datenbasis beschrieben. Der Aufbau basiert auf folgenden Grundlagen:

- Es werden Relationen ausgewählt, für die dann Fahrzeitdaten ermittelt werden.
- Als streckenbezogene Datenquelle wird TomTom genutzt (siehe Kapitel 5.1).
- Als relationsbezogene Datenquelle wird Google genutzt (siehe Kapitel 5.2).
- Es werden Fahrzeiten aus dem Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate und dem Landesverkehrsmodell Bayern ergänzt.
- Alle Fahrzeitdaten enthalten keine Anbindungszeiten (Zugangs-, Abgangs- und Parksuchzeiten).

Für die Datenquellen TomTom und Google werden als ein erstes Ergebnis die Verteilung der Luftliniengeschwindigkeiten und der Fahrtgeschwindigkeit über alle Relationen in Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2 ausgewertet. In Kapitel 5.3 werden die Fahrzeiten der beiden Datenquellen gegenübergestellt. Es zeigt sich bei beiden Datenquellen ein relativ kleiner Einfluss der Tageszeit auf die Fahrzeit bzw. die Fahrtgeschwindigkeit. Um dieses unerwartete Ergebnis zu verstehen, werden in Kapitel 5.4 die Fahrzeiten der Datenquelle TomTom auf Streckenebene analysiert. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass durch die Auswahl der Relationen die Strecken in Ballungsräumen unterrepräsentiert sind. Das führt dazu, dass die tatsächlichen Verlust-

zeiten pro Kilometer für eine durchschnittliche Pkw-Fahrt höher sind, als für eine durchschnittliche Relation aus der Menge der ausgewählten Relationen.

## 5.1 Datenbasis aus streckenbasierten FCD

In Kapitel 3 wurden die Fahrzeitdaten für ausgewählte Relationen verglichen. Für die weitere Untersuchung wurde für die streckenbasierten Datenquellen entschieden, die Daten des Anbieters TomTom zu verwenden. Diese Datenquelle ermöglicht Auswertungen für die mittlere Fahrzeit und für Perzentile der Fahrzeit. Die Daten basieren außerdem auf einer vergleichsweise hohen Anzahl an Beobachtungen.

### 5.1.1 Auswahl des Streckennetzes

Die Auswahl des zu untersuchenden Streckennetzes wird auf der Grundlage der ausgewählten zentralen Orte (vgl. Kapitel 4.4.2) und Relationen (vgl. Kapitel 4.4.3) vorgenommen. Dafür wird zunächst das vollständige Streckennetz Deutschlands von TomTom in die Software PTV Visum importiert. Die zentralen Orte definieren Verkehrszellen, die jeweils mit einer Anbindung an einen Knoten des Streckennetzes angebunden werden. Die Auswahl der Knoten erfolgte anhand folgender Kriterien:

- Sowohl die Eingangs- als auch die Ausgangsstrecke des Knotens muss für die drei Verkehrssysteme Pkw, Lieferwagen und Lkw befahrbar sein,
- Weder Eingangs- noch Ausgangsstrecke des Knotens darf der Straßenklasse Autobahn angehören.

Zur Identifikation von Autobahnen wurde das von TomTom gelieferte Streckenattribut Functional-Road-Class (FRC) verwendet. TomTom weist jeder Strecke einer Klasse von 0 (bzw. -1) bis 8 zu. Die Tabelle 5-1 gibt eine Übersicht über das Attribut Functional-Road-Class und die Beschreibung der Klassen. Bild 5-1 zeigt die Verteilung der Anbindungen an das Streckennetz differenziert nach der Functional-Road-Class.

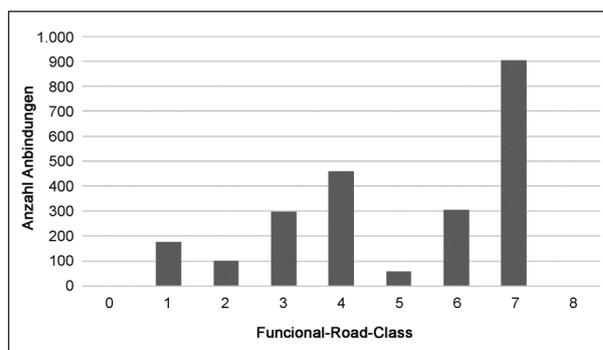


Bild 5-1: Verteilung der Anbindungen auf die Functional-Road-Class

Wert	Verbindungsfunktion	Beispiele	Beschreibung von TomTom
-1	keine FRC verfügbar	Fährstrecken	No functional road class available (e.g. ferry)
0	Internationale bis nationale Verbindungsfunktion	Autobahnen (Europastraßen) und autobahnähnliche Bundesstraßen	A motorway, freeway, or other major arterial roads
1	Nationale Verbindungsfunktion	Bundesstraßen, Autobahnen mit niedriger Verbindungsfunktion	A major road less important than a motorway, freeway, or other major arterial roads
2	Regionale bis nationale Verbindungsfunktion	Landes-/Staatsstraßen	Other major road which attracts significant volumes of traffic but which is not included by TomTom in Functional Classes 1 or 2
3	Regionale Verbindungsfunktion	Kreisstraßen	Secondary roads
4	Lokale bis regionale Verbindungsfunktion	Verbindungsstraßen zwischen Orten	Local connecting roads
5	Lokale Verbindungsfunktion	Hauptstraßen innerhalb von Orten	Local roads of high importance
6	keine oder nur lokale Verbindungsfunktion	Sammelstraßen innerhalb von Orten	Local roads
7	keine Verbindungsfunktion	Anlieger-/Erschließungsstraßen	Local roads of minor importance
8	restliche Straßen und Wege	Feld- und Waldwege, nicht öffentliche Strecken, Fuß- und Radwege	All other roads contained within the TomTom Traffic Stats Database

Tab. 5-1: Beschreibung des Streckenattributs Functional-Road-Class

Die ausgewählten Relationen zwischen den zentralen Orten werden in PTV Visum in Form einer Quelle-Ziel-Matrix implementiert. Alle ausgewählten Relationen haben in dieser Matrix jeweils den Wert 1, alle nicht ausgewählten Relationen den Wert 0 (vgl. Bild 5-2).

Im nächsten Schritt wird für alle ausgewählten Relationen die jeweils beste Route bestimmt. Dafür wird die Matrix mit einer Bestweg-Umlegung auf das Netz umgelegt. Auf diese Weise wird die Streckenfolge zwischen Start- und Zielort ermittelt, die den niedrigsten Widerstand aufweist. Als Widerstand wird die von TomTom ermittelte Fahrzeit bei freiem Verkehrsfluss verwendet. TomTom berechnet diesen Wert aus Floating-Car-Daten. Dabei werden während schwach belasteter Nachtstunden gemessene Fahrzeiten auf der betrachteten Strecke aus einem Zeitraum von 24 Monaten verwendet. Die Messdaten, die Lkw zugeordnet werden können, werden dabei nicht berücksichtigt.

Tabelle 5-2 gibt eine Übersicht über die Ergebnisse der Streckennetz-Auswahl. Von den insgesamt 1,6 Mio. km Streckennetz in Deutschland (richtungsgetrennte Netzlänge mit Filter auf „mit Pkw befahrbare Strecken“) werden etwa 176.000 km ausgewählt. Das entspricht einem Anteil von 11 % des Gesamtnetzes. Der Anteil variiert in Abhängigkeit der Functional-Road-Class. Bei Straßen der FRC 0 sind 96 % der Streckenlänge enthalten, bei Strecken der FRC 1 sind es 74 %.

### 5.1.2 Datengrundlagen

Im nächsten Schritt wurden die historischen Geschwindigkeitsdaten von TomTom für das ausgewählte Streckennetz abgefragt und als Streckenattribute in PTV Visum importiert. TomTom hat sich bereit erklärt, für das gesamte ausgewählte Streckennetz Daten aus der TomTom Stats Datenbank zur Verfügung zu stellen, sodass im gesamten Netz

2.303 x 2.303			1001000	1002000	1003000	1004000	1051011	1051016	1051044	1051074	1053032	1053090
	Name		Flensburg	Kiel	Lübeck	Neumünster	Brunsbüttel	(Dithmarschen)	Heide	Meldorf	Geesthacht	Mölln
		Summe	31	43	46	22	14	0	15	15	17	21
1001000	Flensburg	32	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
1002000	Kiel	43	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
1003000	Lübeck	46	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
1004000	Neumünster	22	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0
1051011	Brunsbüttel	14	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
1051016	Burg (Dithmarschen)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1051044	Heide	15	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
1051074	Meldorf	15	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
1053032	Geesthacht	17	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
1053090	Mölln	21	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0

Bild 5-2: Auszug aus der Quelle-Ziel-Matrix für die Auswahl der Relationen (Matrixwert > 1)

FRC	Streckennetz gesamt (Filter: min. für Pkw befahrbar)		Ausgewähltes Streckennetz (Filter: min. für Pkw befahrbar)		Anteil des ausgewählten Streckennetzes nach FRC		Längenbasierter Anteil der jeweiligen FRC am ausgewählten Streckennetz
	Anzahl Strecken	Länge (km)	Anzahl Strecken	Länge (km)	Anzahl Strecken	Länge (km)	
-1	732	5,924	140	43	19.1 %	1	0.0 %
0	107,824	27,279	101,898	26,109	94.5 %	95.7 %	14.8 %
1	678,378	81,501	476,938	60,116	70.3 %	73.8 %	34.1 %
2	367,151	42,384	172,658	20,973	47.0 %	49.5 %	11.9 %
3	1,129,135	129,513	298,244	33,818	26.4 %	26.1 %	19.2 %
4	2,948,681	346,207	274,084	30,792	9.3 %	8.9 %	17.5 %
5	133,295	9,818	9,186	608	6.9 %	6.2 %	0.3 %
6	1,185,038	116,683	21,319	1,689	1.8 %	1.4 %	1.0 %
7	9,298,289	847,426	24,585	1,974	0.3 %	0.2 %	1.1 %
8	870	56	0	0	0.0 %	0.0 %	0.0 %
<b>Summe</b>	<b>15,849,393</b>	<b>1,606,792</b>	<b>1,379,052</b>	<b>176,122</b>	<b>8.7 %</b>	<b>11.0 %</b>	<b>100.0 %</b>

Tab. 5-2: Statistik zur Auswahl des Streckennetzes

auf die gleiche Datengrundlage zurückgegriffen werden konnte.

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, kann auf die historischen Geschwindigkeitsdaten von TomTom über ein Webportal oder über eine API-Schnittstelle zugegriffen werden. Aufgrund des großen Umfangs der abzufragenden Daten wurde hier die API-Schnittstelle verwendet. Folgende Daten wurden abgefragt:

- Streckennetz: TomTom Release 2016-12 für Deutschland
- Streckenauswahl: siehe Kapitel 5.1.1
- Zeitraum: 08.01.2017 – 22.12.2017  
Ausgeschlossene Zeiträume aufgrund von Ferien und Feiertagen:
  - 10.04.2017 – 21.04.2017
  - 25.05.2017 – 26.05.2017
  - 02.10.2017 – 03.10.2017
  - 30.10.2017 – 03.11.2017
- Ausgewählte Wochentagaggregation: Montag-Freitag
- Stundenwerte (jeweils als aggregierter Wert für die Wochentage Montag-Freitag) der Zeitscheiben:
  - 07:00 – 08:00 Uhr
  - 10:00 – 11:00 Uhr
  - 17:00 – 18:00 Uhr
  - 20:00 – 21:00 Uhr
- Ausgewähltes Verkehrssystem: „Private“. Es werden nur Daten einer Auswahl von Fahrzeugen abgefragt, die sich laut TomTom größtenteils aus privaten Pkw zusammensetzt.

Die gelieferten Daten umfassen je Zeitscheibe, Strecke und Richtung, aggregiert für den abgefragten Zeitraum und für die gewählte Wochentagaggregation unter anderem:

- Anzahl der Messungen (Stichprobengröße)
- Perzentile der Geschwindigkeit/Fahrtzeit (in 5%-Schritten)
- Freifahrtgeschwindigkeit
- Zulässige Höchstgeschwindigkeit

- Statistische Kennwerte:
  - Harmonischer Durchschnitt der Geschwindigkeit
  - Standardabweichung der Geschwindigkeit
  - Standardabweichung der Fahrtzeit

### 5.1.3 Ermittlung der Fahrtzeiten

Für den Pkw werden Fahrtzeiten für folgende Ausprägungen berechnet:

- 32 Tageszeitabhängige Ist-Fahrtzeiten
  - 4 Zeiträume: mHVZ, aHVZ, NVZ, SVZ
  - 2 Berechnungsmethoden: statisch und dynamisch
  - 4 Fahrzeitausprägungen: Perzentile 50 %, 75 %, 90 % und Mittelwert
- 6 Fahrtzeiten als mögliche Soll-Fahrtzeiten
  - 3 Fahrzeitausprägungen: Fahrtzeit bei freiem Verkehrsfluss (TomTom-Freeflow), 15 % Perzentil um 20 Uhr, 50 % Perzentil um 20 Uhr
  - Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit: ja/nein

Für den Lkw werden Fahrtzeiten für folgende Ausprägungen berechnet:

- 16 Tageszeitabhängige Ist-Fahrtzeiten
  - 4 Zeiträume: mHVZ, aHVZ, NVZ, SVZ
  - 1 Berechnungsmethode: statisch
  - 4 Fahrzeitausprägungen: Perzentile 50 %, 75 %, 90 % und Mittelwert
- 6 Fahrtzeiten als mögliche Soll-Fahrtzeiten
  - 3 Fahrzeitausprägungen: Fahrtzeit bei freiem Verkehrsfluss (TomTom-Freeflow), 15 % Perzentil um 20 Uhr, 50 % Perzentil um 20 Uhr
  - Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit: ja/nein

Die Lkw-Fahrtzeitberechnung basiert auf den Pkw-Geschwindigkeiten, die auf jeder Strecke durch eine zulässige Geschwindigkeit begrenzt wird:

- FRC 0, 1 und 2: 80 km/h
- Sonstige Straßen: 60 km/h

Zeiträume mit verfügbaren Geschwindigkeitsdaten		Zuordnung der verfügbaren Geschwindigkeitsdaten auf die Zeiträume eines Tages	
Zeitraum	Verkehrszeit	Zeitraum	Verkehrszeit
07:00 – 08:00	mHVZ	00:00 – 06:00	SVZ
10:00 – 11:00	NVZ	06:00 – 09:00	mHVZ
17:00 – 18:00	aHVZ	09:00 – 16:00	NVZ
20:00 – 21:00	SVZ	16:00 – 18:00	aHVZ
		18:00 – 20:00	NVZ
		20:00 – 00:00	SVZ

Tab. 5-3: Zuweisung der Zeiträume des Tages zu den verfügbaren Zeiträumen

Für die Datenbasis werden mit den streckenbasierten FCD Fahrtzeitdaten für Relationen ermittelt. Die räumliche Aggregation der Fahrtzeitdaten von Teilstrecken zu längeren Entfernungen ist für mittlere Fahrtzeiten durch einfache Aufsummierung möglich. Fahrtzeitverteilungen können jedoch nur dann aufsummiert werden, wenn die beobachteten Häufigkeitsverteilungen normalverteilt sind (siehe Seite 11, Räumliche Aggregation von Fahrtzeitdaten).

Die Annahme einer Normalverteilung ist bei Fahrtzeitverteilungen in der Regel nicht gegeben. Eine Aufsummierung von Perzentilen der Fahrtzeit über mehrere Teilstrecken kann deshalb für eine Relation Fahrtzeiten liefern, die von den Fahrtzeiten abweichen, die sich aus kompletten FCD-Fahrzeugtrajektorien ergeben.

Um Aussagen über Fahrtzeiten für die Zustände freier Verkehr (Perzentil 15 %), ohne Störung (Perzentil 50 %) und mit Störungen (Perzentil 75 % und 90 %) machen zu können, enthält die Datenbasis trotzdem relationsbezogene Fahrtzeiten für Perzentile (15 %, 50 %, 75 %, 90 %), die aus den Fahrtzeitperzentilen von Teilstrecken aufsummiert werden. Da die Fahrtzeitperzentile aus den FCD eines ganzen Jahres abgeleitet werden, sollten seltene und sehr große Störungen nicht in den Fahrtzeitperzentilen enthalten sein. Der Vergleich mit den relationsbezogenen Fahrtzeitdaten der Datenquelle Google (siehe Kapitel 5.3) lässt vermuten, dass die so ermittelten Fahrtzeiten für den Zustand mit Störungen in der richtigen Größenordnung liegen. Trotzdem muss die Einschränkung bei der Interpretation der Daten beachtet werden.

Liegt für eine Strecke in einem bestimmten Zeitraum eine Stichprobengröße von weniger als 30 Fahrzeugen vor, so wird für die Strecke die Freifahrtgeschwindigkeit gewählt.

Bei der statischen Fahrtzeitberechnung werden für die komplette Route die Geschwindigkeiten für den ausgewählten Zeitraum genutzt.

Bei Fahrtzeiten von über einer Stunde ergeben sich bei der statischen Fahrtzeitberechnung Fehler, da dann die Geschwindigkeiten des folgenden Zeitraums herangezogen werden müssten. Aus diesem Grund erfolgt die Fahrtzeitberechnung zusätzlich dynamisch. Bei der dynamischen Fahrtzeitberechnung werden die Geschwindigkeitsdaten des Zeitraums genutzt, in dem sich eine Zeit-Weg-Trajektorie mit einem vorgegebenen Abfahrtszeitpunkt gerade befindet. Da in diesem Projekt Geschwindigkeitsdaten nur für vier Ein-Stunden-Zeiträume zur Verfügung stehen, wird für die dynamische Fahrtzeitberechnung jeder Stunde des Tages einer der vier verfügbaren Zeiträume zugewiesen (siehe Tabelle 5-3).

#### 5.1.4 Ergebnisse

##### Längenanteile je Straßenfunktionsklasse

Tabelle 5-4 zeigt für die ausgewählten Relationen die Längenanteile, die auf die 8 Straßenfunktionsklassen 0 bis 7 entfallen. Es ist gut erkennbar, dass der Anteil der hochrangigen Straßenfunktionsklassen von der Verbindungsfunktionsstufe und vom Nachbarschaftsgrad abhängen. Eine höherrangige Verbindungsfunktionsstufe und ein höherer Nachbarschaftsgrad erhöhen die Luftlinienentfernung und damit den Anteil an hochrangigen Straßenfunktionsklassen.

##### Einfluss der Berechnungsmethode

Da nur Geschwindigkeiten für vier Tageszeiten verfügbar sind, können die tageszeitlichen Geschwindigkeiten nicht detailliert abgebildet werden. Die Ergebnisse der statischen und der dynamischen Fahrtzeitberechnung für die ausgewählten Relationen unterscheiden sich deshalb nur wenig. Bild 5-3 zeigt den Vergleich der statischen und dynamischen Berechnungen für den Zeitraum 07:00 Uhr und die Perzentile 75 % und 90 %:

VFS	VFS 0				VFS I			VFS II		VFS III		OZ/MR		
Nachbarschaftsgrad	1	2	3	4	1	2	3	1	2	1	1			
Entfernungsbereich [km]							125-500			5-10	10-15			
Relationen	110				1.618			1.306		15.478		988	500	1.582
FRC 0	93 %	96 %	97 %	97 %	66 %	81 %	88 %	22 %	38 %	5 %	7 %	95 %		
FRC 1	4 %	3 %	2 %	2 %	24 %	14 %	9 %	41 %	37 %	25 %	26 %	4 %		
FRC 2	1 %	1 %	0 %	0 %	4 %	2 %	1 %	10 %	8 %	9 %	12 %	1 %		
FRC 3	0 %	0 %	0 %	0 %	3 %	1 %	1 %	13 %	9 %	25 %	26 %	0 %		
FRC 4	1 %	0 %	0 %	0 %	2 %	1 %	1 %	11 %	7 %	30 %	25 %	0 %		
FRC 5	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	0 %	0 %		
FRC 6	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	1 %	2 %	1 %	0 %		
FRC 7	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	1 %	3 %	2 %	0 %		

Tab. 5-4: Längenanteile der ausgewählten Relationen differenziert nach Straßenfunktionsklasse

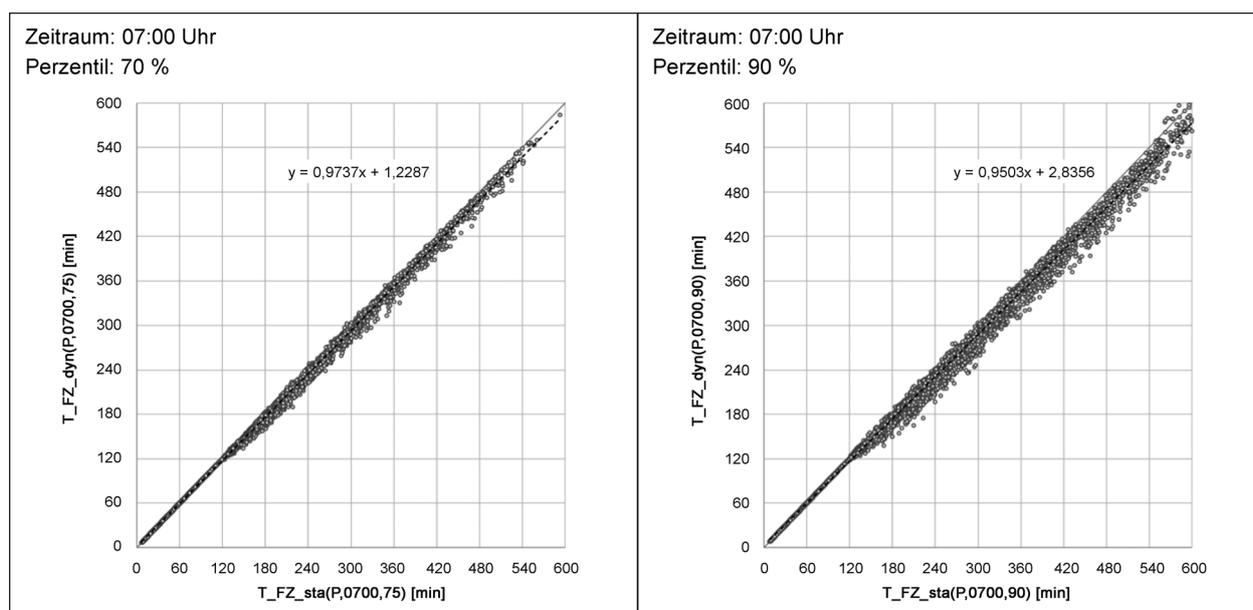


Bild 5-3: Vergleich der Berechnungsmethoden (x-Achse: statisch, y-Achse dynamisch)

- Die Fahrtzeiten auf Relationen < 200 km sind fast identisch. Sie weichen um weniger als 1 % ab.
- Bei Relationen über 200 km ist ein Unterschied erkennbar. Die Fahrtzeiten der dynamischen Berechnungen sind beim Perzentil  $p=90\%$  etwa 4 % schneller als die statischen Berechnungsergebnisse.

Aufgrund der geringen Abweichung werden die dynamischen Fahrtzeitergebnisse im Folgenden nicht weiter ausgewiesen und analysiert.

### Vergleich der Fahrtzeiten nach der Tageszeit

Um einen Überblick über die relationsbezogenen Fahrtzeitdaten der Datenquelle TomTom zu bekommen, werden die Luftliniengeschwindigkeiten (ohne Anbindungszeiten) der Relationen nach Geschwindigkeitsklassen ausgewertet. Dabei werden keine Anbindungszeiten berücksichtigt. In den Bildern 5-4 bis Bild 5-7 sind Summenhäufigkeitsverteilungen der Luftlinien- und Fahrtgeschwindigkeit für die ausgewerteten Relationen für die Perzentile 50 %, 75 %, 90 % und den Mittelwert für die Abfahrtszeiten

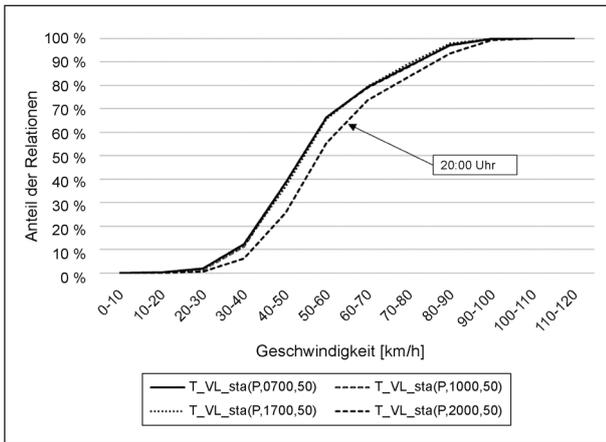


Bild 5-4: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten für das 50%-Perzentil der Streckengeschwindigkeiten für vier Tageszeiträume

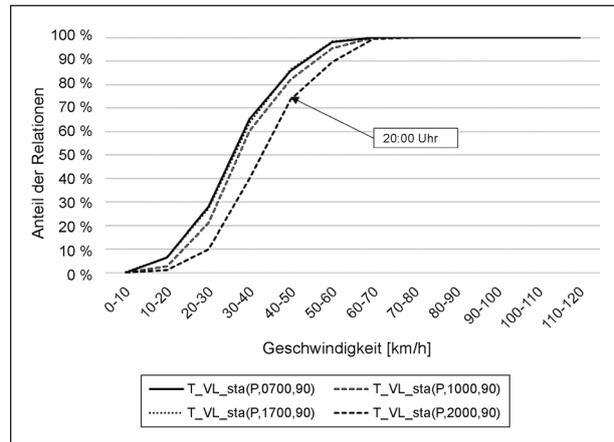


Bild 5-6: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten für das 90%-Perzentil der Streckengeschwindigkeiten für vier Tageszeiträume

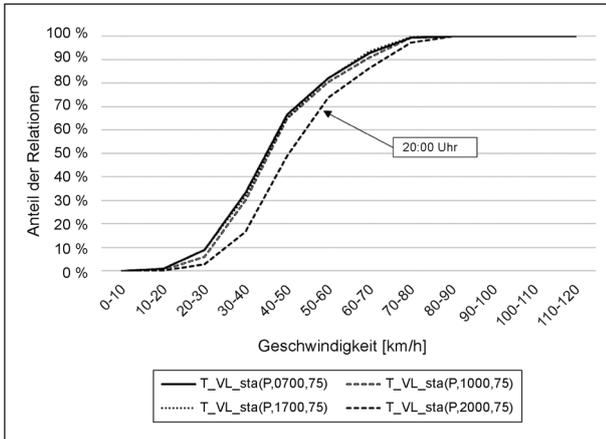


Bild 5-5: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten für das 75%-Perzentil der Streckengeschwindigkeiten für vier Tageszeiträume

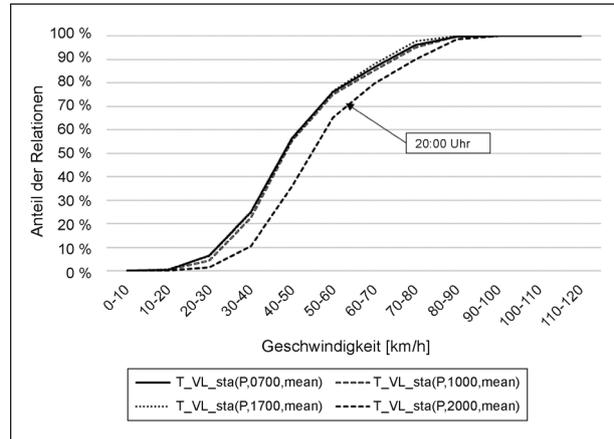


Bild 5-7: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten für den Mittelwert der Streckengeschwindigkeiten für vier Tageszeiträume

07:00 Uhr, 10:00 Uhr, 17:00 Uhr und 20:00 Uhr dargestellt.

Die Bilder zeigen die Ergebnisse der statischen Fahrtzeitberechnung. Bei einer dynamischen Fahrtzeitberechnung ergeben sich ähnliche Ergebnisse, da viele Relationen kurz sind und die tageszeitliche Differenzierung mit den vier Tageszeiträumen nur bei langen Relationen zu Unterschieden führt.

Die Auswertungen zeigen Folgendes:

- Bei den Perzentilen 50 %, 70 % und dem Mittelwert gibt es bei den Zeiträumen 07:00 Uhr, 10:00 Uhr und 17:00 Uhr nur geringe Unterschiede. Die relationsbezogenen Geschwindigkeiten sind nur im Zeitraum 20:00 Uhr erkennbar höher.

- Beim 90 % Perzentilen ist eine Geschwindigkeitszunahme in folgender Reihenfolge erkennbar: 07:00 Uhr, 17:00 Uhr, und 10:00 Uhr und 20:00 Uhr.

## 5.2 Datenbasis aus relationsbasierten FCD

Zusätzlich zu den streckenbasierten Fahrtzeiten des Anbieters TomTom werden der Datenbasis für alle Relationen Fahrtzeiten aus Google hinzugefügt. Diese Fahrtzeiten werden nicht wie die TomTom-Daten über eine Folge von Strecken aufsummiert, sondern direkt als relationsbasierte Daten erfasst.

### 5.2.1 Datengrundlagen

Über die „Google Maps Distance Matrix“ (siehe Kapitel 2.4) können die von Google ausgegebenen Fahrtzeiten abgefragt werden. Die Abfragen erfolgen mit Hilfe einer selbstentwickelten Java-Applikation über die „Google-Maps-Distance-Matrix“. Als Start- und Zielorte werden die in Kapitel 4.5 festgelegten Koordinatenpunkte übernommen. Die Start- und Zielorte sind somit identisch mit den Orten der TomTom-Auswertung. Die für die Fahrtzeitermittlung notwendigen Übergabeparameter werden in die Java-Applikation übergeben und über eine http-Anfrage an den Webserver der Google LLC übermittelt. Der Webserver sendet die Ergebnisse der Abfrage zurück an die Applikation, die die Daten in CSV-Dateien (Comma-separated values) speichert.

Die Abfragen wurden für alle ausgewählten Relationen getätigt und erfolgten für alle fünf Werkstage der Woche vom 05.11.2018 bis zum 09.11.2018. Der Best-Guess-Wert wurde für alle fünf Werkstage erfasst. Für den Dienstag wurden zusätzlich der Pessimistic-Wert und der Optimistic-Wert abgefragt. Es wurden pro Tag Fahrtzeiten für 9 Abfahrtszeiten abgefragt. Zusätzlich wurden für Sonntag den 14.07.2019 Abfragen für 07:00 Uhr durchgeführt. Die Abfragen haben damit folgenden Umfang:

- Relationen: 21.582
- Abfahrtszeitpunkte
  - 04:00 Uhr
  - 06:00 Uhr
  - 07:00 Uhr
  - 08:00 Uhr
  - 10:00 Uhr
  - 14:00 Uhr
  - 17:00 Uhr
  - 18:00 Uhr
  - 20:00 Uhr
- Wochentage
  - Montag: 05.11.2018, Best-Guess-Wert
  - Dienstag: 06.11.2018, Best-Guess-Wert, Pessimistic-Wert, Optimistic-Wert
  - Mittwoch: 07.11.2018, Best-Guess-Wert
  - Donnerstag: 08.11.2018, Best-Guess-Wert
  - Freitag: 09.11.2018, Best-Guess-Wert
  - Sonntag: 14.07.2019, Best-Guess-Wert

Bei den Abfragen unterscheidet Google nicht zwischen verschiedenen Kalendertagen in unterschiedlichen Wochen. Die Abfrage Montag 05.11.2018 um 07:00 Uhr ergibt die gleiche Fahrtzeit wie die Abfrage Montag 12.11.2018 um 07:00 Uhr. Alle Abfragen wurden mit dem Übergabeparameter „alternatives = true“ getätigt. Dies bedeutet, dass die Antwort auf die Abfrage beim Google-Dienst mehr als eine Route zurückgeben kann. Es werden somit zwischen einer und drei Routen pro Relation und Zeitpunkt ausgegeben. Weitere Rückgabeparameter sind; die Routenlänge, die „duration“ und die „durationintrafficBestGuess“ bzw. für die Abfragen am Dienstag zusätzlich „durationintrafficPessimistic“ und „durationintrafficOptimistic“. Der Wert „duration“ ist unabhängig des Zeitpunkts der Abfrage für gleiche Relationen und Routen konstant.

Die Google-Abfragen liefern für alle 21.582 Relationen einen Best-Guess-Wert und einen Optimistic-Wert. Die Abfragen des Pessimistic-Wertes ergeben für 232 Relationen keine Ergebnisse, d. h. hier liegen Werte nur für 21.350 Relationen vor.

### 5.2.2 Ergebnisse

Um einen Überblick über die relationsbezogenen Fahrtzeitdaten der Datenquelle Google zu bekommen, werden die Luftlinien- und Fahrtgeschwindigkeiten der Relationen nach Geschwindigkeitsklassen ausgewertet. In Bild 5-8 sind die Summenhäufigkeitsverteilungen der Luftliniengeschwindigkeit für den Best-Guess-Wert für die Abfahrtszeiten 07:00 Uhr, 10:00 Uhr, 17:00 Uhr, 20:00 Uhr und für

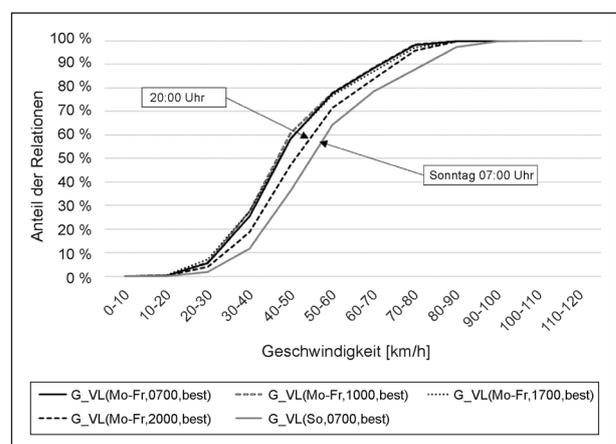


Bild 5-8: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten (VL) für den Best-Guess-Wert für fünf Tageszeiträume 07:00, 10:00, 17:00, 20:00 und Sonntag 07:00 Uhr.

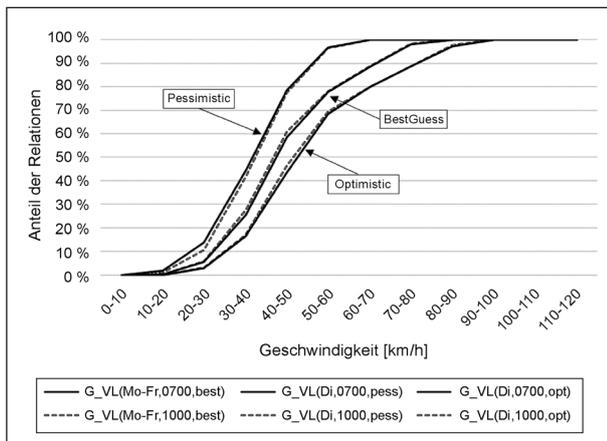


Bild 5-9: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten (VL) für den Best-Guess-, den Pessimistic- und den Optimistic-Wert für zwei Tageszeiträume 07:00 und 10:00 Uhr.

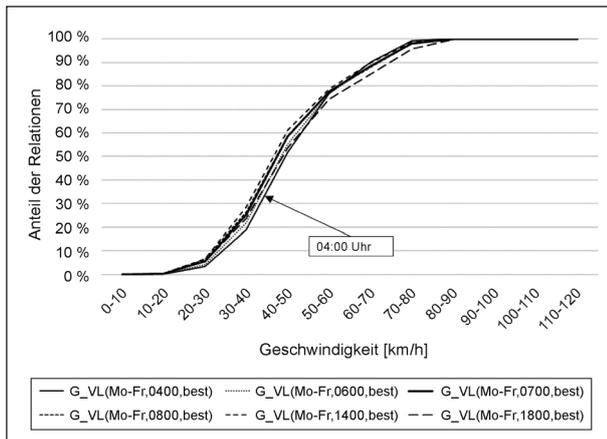


Bild 5-10: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten (VL) für den Best-Guess-Wert für sechs Tageszeiträume 04:00, 06:00, 07:00, 08:00, 14:00 und 18:00 Uhr.

Sonntag 07:00 Uhr dargestellt. Bild 5-10 zeigt die Summenhäufigkeitsverteilungen für zusätzliche Abfahrtszeitpunkte.

Die Auswertung der Google Daten zeigt ähnliche Zusammenhänge wie die TomTom-Daten. Die Unterschiede zwischen der NVZ und der HVZ fallen gering aus, lediglich die Geschwindigkeiten um 20:00 Uhr und am Sonntag um 07:00 Uhr sind erkennbar höher.

### 5.3 Vergleich der Datenquellen auf Relationsebene

Für einen Vergleich der Datenquellen auf Relationsebene werden die Pkw-Fahrtzeitausprägungen mit folgenden Methoden verglichen:

- Stufen der Angebotsqualität: Für jede Fahrtzeitausprägungen werden für die Luftliniengeschwindigkeit die Anteile der SAQ-Werte A bis F bestimmt.
- Verlustzeiten: Für jede Fahrtzeitausprägungen wird die mittlere Verlustzeit ermittelt. Als Soll-Fahrtzeit wird  $t_{DQ=TomTom,i=20:00}^{P50}$  genutzt.
- Fahrtzeitindex: Für je zwei Fahrtzeitausprägungen der Datenquellen TomTom ( $t_{07:00}^{P50}$ ,  $t_{07:00}^{P75}$ ) und Google ( $t_{7:00}^{BestGuess}$ ,  $t_{7:00}^{Pessimistic}$ ) werden die Verteilungen des Fahrtzeitindex dargestellt. Als Soll-Fahrtzeit werden bei TomTom  $t_{20:00}^{P50}$  und bei Google  $t_{20:00}^{BestGuess}$  genutzt.

#### 5.3.1 Stufen der Angebotsqualität

Für die Ermittlung der SAQ-Werte der Luftliniengeschwindigkeit nach den RIN (2008) werden die folgenden Eingangsgrößen genutzt:

- Zugangszeit, Abgangszeit, Parkplatzsuchzeit und Fahrtzeit im untergeordneten Netz aus Tabelle 2-9 in Abhängigkeit der Zentralität der Quell- und Zielorte.
- SAQ-Bewertungsfunktion für Pkw.

Bild 5-11 zeigt die Anteile der SAQ-Werte für jede Fahrtzeitausprägung. Bei den TomTom-Fahrtzeitausprägungen bis zu einem Perzentil von  $p=75\%$  und bei den Google-Fahrtzeitausprägungen Best-Guess dominieren die Stufen A bis C. Höhere Anteile der Stufen D bis E treten erst bei  $p=90\%$  und bei Pessimistic auf.

In Bild 5-12 sind nur die Fahrtzeitausprägungen der mittleren Fahrtzeit dargestellt. Hier ist erkennbar, dass die Angebotsqualität in der HVZ (7:00 Uhr und 17:00 Uhr) und in der NVZ (10:00 Uhr) ähnlich ist. Nur in der SVZ (20:00 Uhr) ergeben sich sichtbar bessere SAQ-Werte.

#### 5.3.2 Verlustzeiten

Wird als Soll-Fahrtzeit  $t_{DQ=TomTom,i=20:00}^{P50}$  genutzt, ergeben sich die in Bild 5-13 dargestellten mittleren Verlustzeiten pro Kilometer [s/km]. Sie zeigen wie bei den SAQ-Werten ähnliche Ergebnisse für die HVZ und die SVZ.

Aus den Verlustzeiten pro Kilometer lassen sich jährliche Verlustzeiten pro Pkw-Nutzer abschätzen.

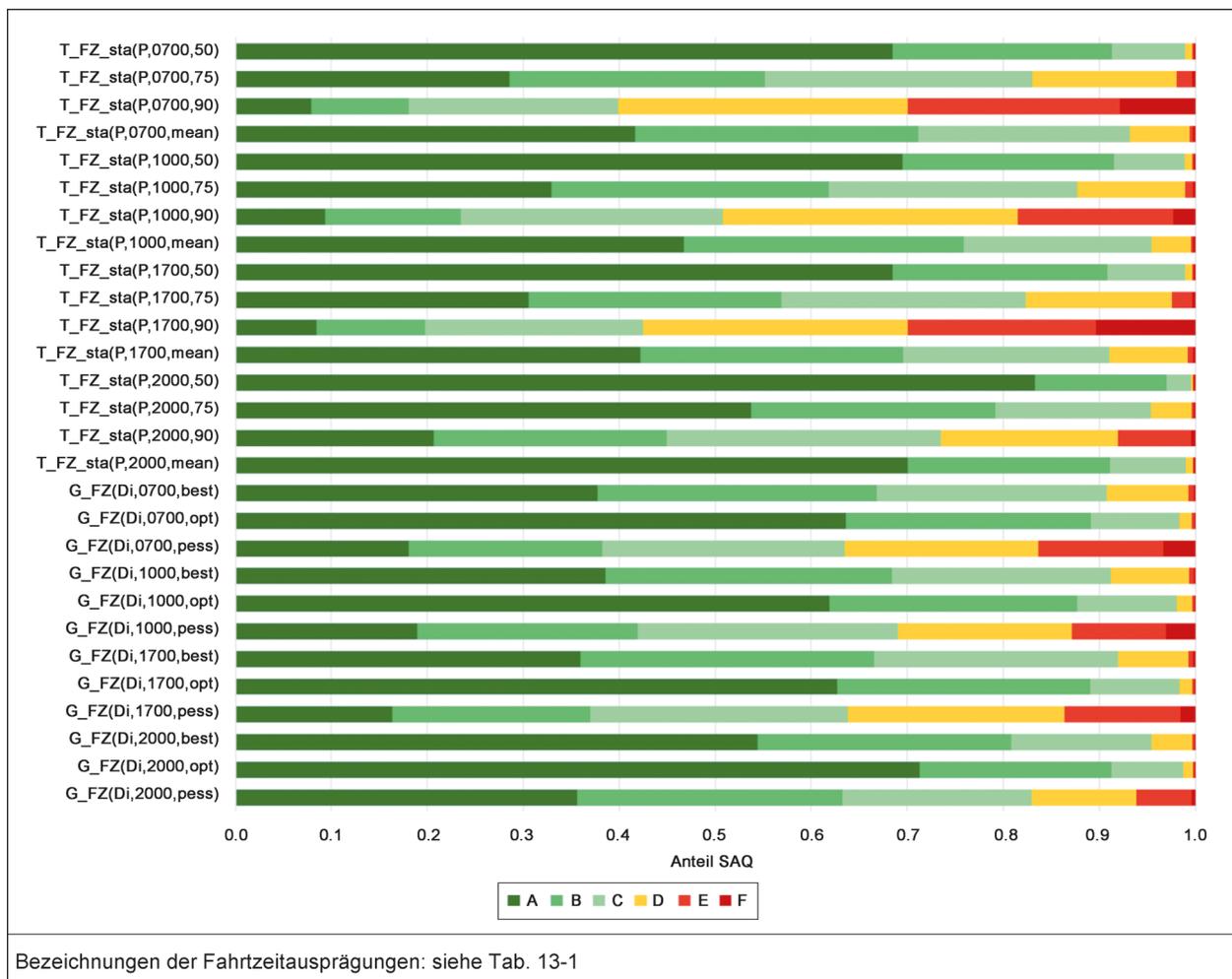


Bild 5-11: Anteile der SAQ-Werte der Luftliniengeschwindigkeit für jede Pkw-Fahrtzeitausprägung nach RIN (2008)

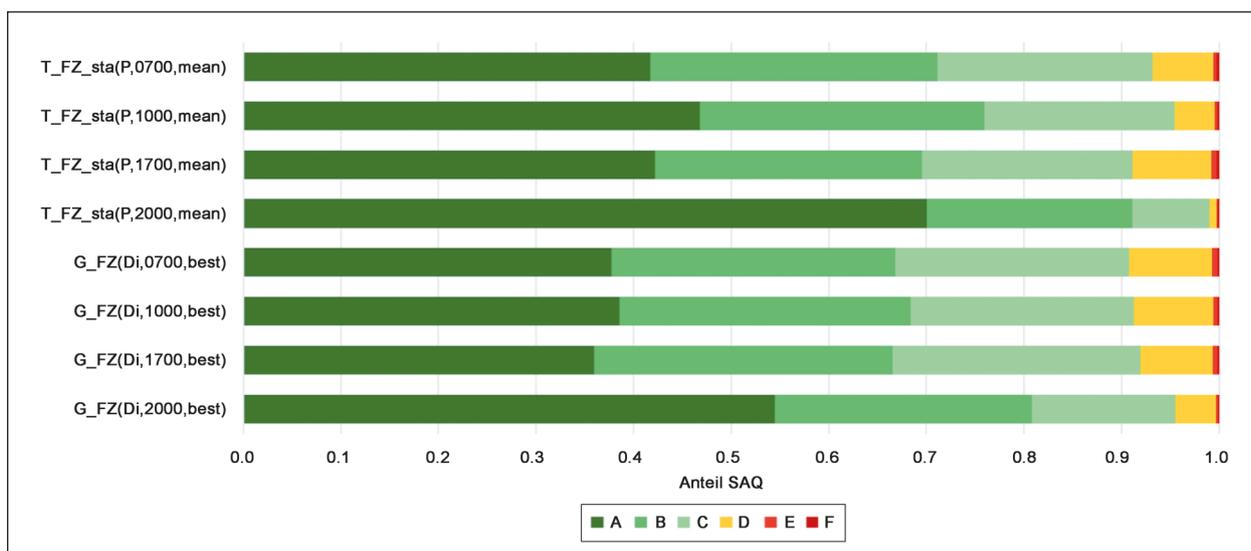


Bild 5-12: Anteile der SAQ-Werte der Luftliniengeschwindigkeit nur für die Mittelwerte der Pkw-Fahrtzeitausprägungen nach RIN (2008)

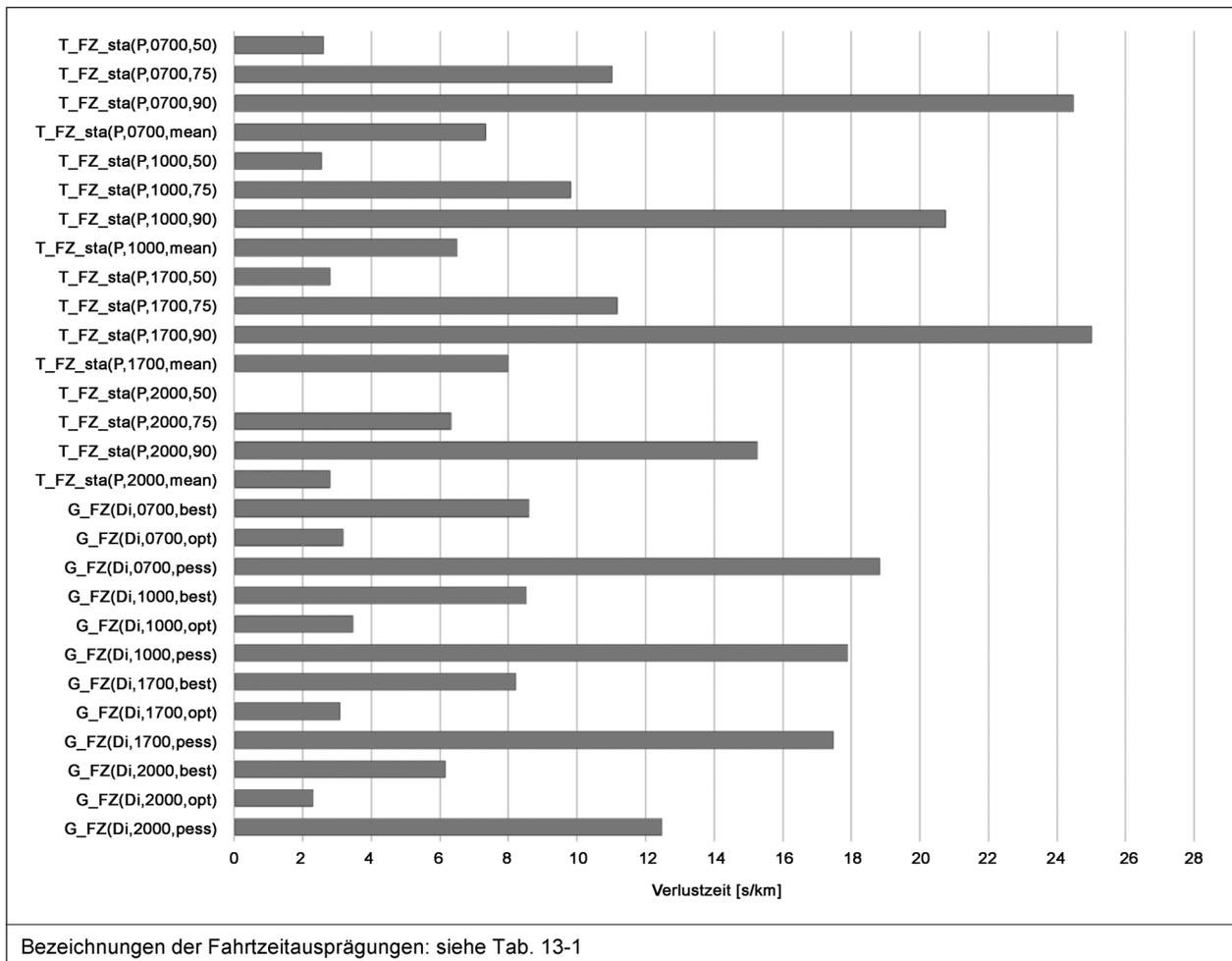


Bild 5-13: Mittlere Verlustzeiten pro Kilometer [s/km] für jede Pkw-Fahrzeitausprägung

Dazu wird die Pkw-Verkehrsleistung aus Verkehr in Zahlen BMVI (2017) durch die Einwohnerzahl in Deutschland dividiert. Der Ergebniswert (ca. 12.000 km) wird mit der Verlustzeit pro Kilometer multipliziert. Die so berechneten Ergebnisse unterstellen, dass die ausgewählten Relationen und die jeweilige Tageszeit für die Ermittlung der Verlustzeitstunden repräsentativ sind, was natürlich nicht der Fall ist. Die Ergebnisse sind in Bild 5-14 dargestellt.

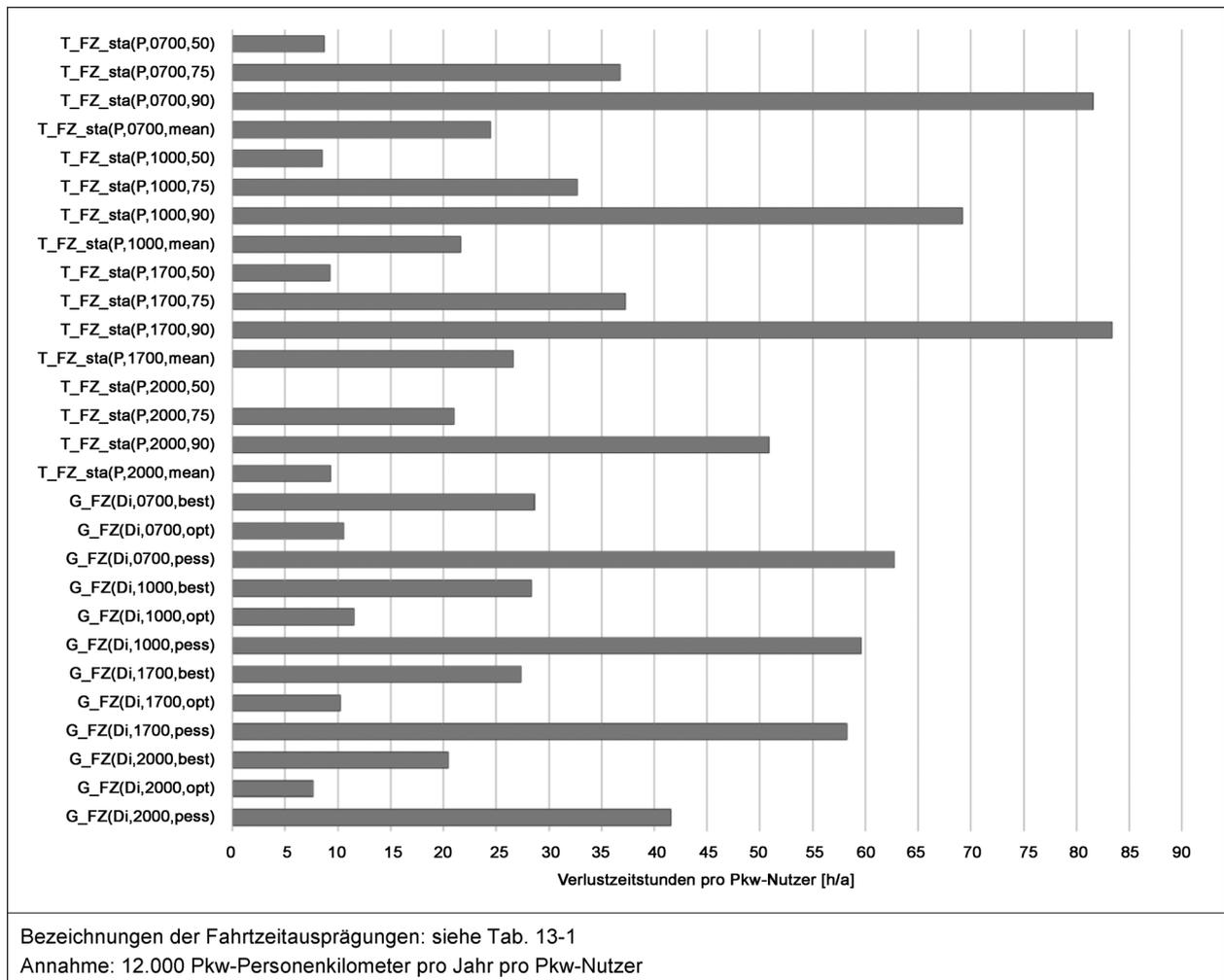


Bild 5-14: Mittlere jährliche Verlustzeiten pro Pkw-Nutzer [h/a] für jede Pkw-Fahrzeitausprägung

### 5.3.3 Fahrtzeitindex

Für den Vergleich der beiden Datenquellen TomTom und Google wird der Fahrtzeitindex berechnet und dann der Anteil der Relationen je Fahrtzeitindexklasse dargestellt. Bei TomTom wird die Soll-Fahrtzeit aus dem 50%-Perzentil des SVZ abgeleitet, bei Google aus dem Best-Guess-Wert der SVZ:

- Fahrtzeitindex TomTom:  $f_{DQ=TomTom,i=7:00}^{TTI,P50} = \frac{t_{7:00}^{P50}}{t_{20:00}^{P50}}$

- Fahrtzeitindex TomTom:  $f_{DQ=TomTom,i=7:00}^{TTI,P75} = \frac{t_{7:00}^{P75}}{t_{20:00}^{P50}}$

- Fahrtzeitindex Google:  $f_{DQ=Google,i=7:00}^{TTI,BestGuess} = \frac{t_{7:00}^{BestGuess}}{t_{20:00}^{BestGuess}}$

- Fahrtzeitindex Google:  $f_{DQ=Google,i=7:00}^{TTI,Pessimistic} = \frac{t_{7:00}^{Pessimistic}}{t_{20:00}^{BestGuess}}$

Die in Bild 5-15 dargestellten Verteilungen über alle ausgewählten Relationen zeigen Folgendes:

- Für  $f_{DQ=TomTom,i=7:00}^{TTI,P50}$  und  $f_{DQ=Google,i=7:00}^{TTI,BestGuess}$  ergeben sich ähnliche Verteilungen. Die Fahrtzeitverlängerungen sind klein. Der Mittelwert liegt bei etwas unter 1,1. Bei 95 % der Relationen ist der Fahrtzeitindex kleiner als 1,2.
- Für  $f_{DQ=TomTom,i=7:00}^{TTI,P75}$  und  $f_{DQ=Google,i=7:00}^{TTI,Pessimistic}$  ergeben sich ähnliche Mittelwerte der Verteilungen von etwa 1,3. Bei 95 % der Relationen ist der Fahrtzeitindex kleiner als 1,5. Die Standardabweichung ist bei den Google-Werten allerdings größer als bei den TomTom-Werten.

Um den Einfluss der Fahrtweite auf den Fahrtzeitindex zu analysieren, werden die Verteilungen des Fahrtzeitindex in Bild 5-16 bis Bild 5-19 jeweils nach sechs Entfernungsklassen (Klassenbreite = 100 km) differenziert. Die Verteilungen zeigen Folgendes:

- Für die Verteilungen  $f_{DQ=TomTom,i=7:00}^{TTI,P50}$ ,  $f_{DQ=TomTom,i=7:00}^{TTI,P75}$  und  $f_{DQ=Google,i=7:00}^{TTI,BestGuess}$  sinkt der Mittelwert und die Standardabweichung des Fahrtzeitindex mit der Entfernungsklasse.
- Für  $f_{DQ=Google,i=7:00}^{TTI,Pessimistic}$  ist der Fahrtzeitindex in der Entfernungsklasse 0 – 100 km mit einem Mittelwert von 1,25 deutlich niedriger als in den höheren Entfernungsklassen, in denen der Mittelwert zwischen 1,29 und 1,37 liegt.

wärts auftreten, bei denen die Hauptverkehrszeit am Abend auftritt. Es trifft aber insbesondere Relationen bei denen es wenig Störungen gibt.

Das abweichende Ergebnis bei  $f_{DQ=Google,i=7:00}^{TTI,Pessimistic}$  erklärt sich daraus, dass bei Google die Fahrtzeitdifferenzen  $t_{20:00}^{BestGuess}$ ,  $t_{7:00}^{BestGuess}$  und  $t_{7:00}^{Pessimistic}$  bei kurzen Relationen (< 20 Kilometer) oft in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Es gibt rund 500 Relationen, bei denen die Pessimistic-Fahrtzeit in der mHVZ kürzer ist die Best-Guess-Fahrtzeit in der SVZ. Das kann zum einen bei Relationen stadtaus-

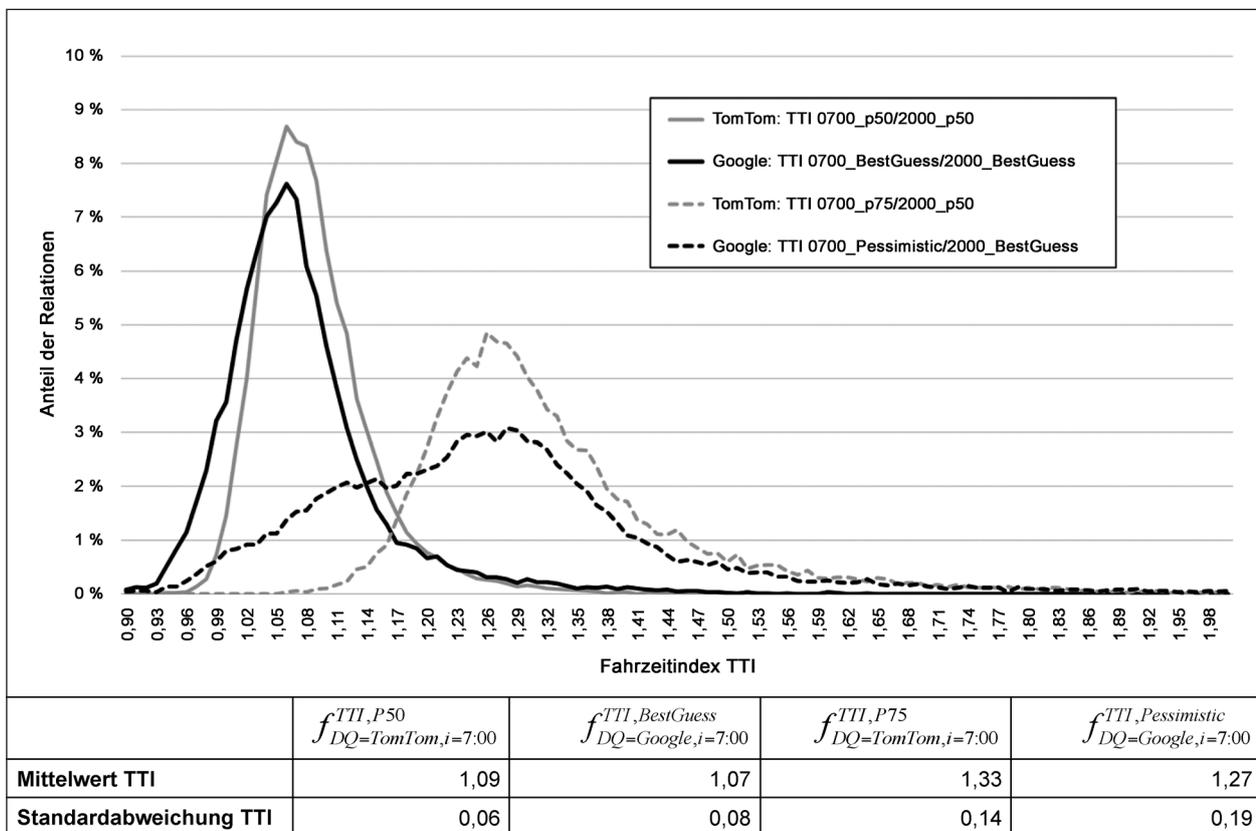


Bild 5-15: Verteilungen des Fahrtzeitindex für die Datenquellen TomTom und Google

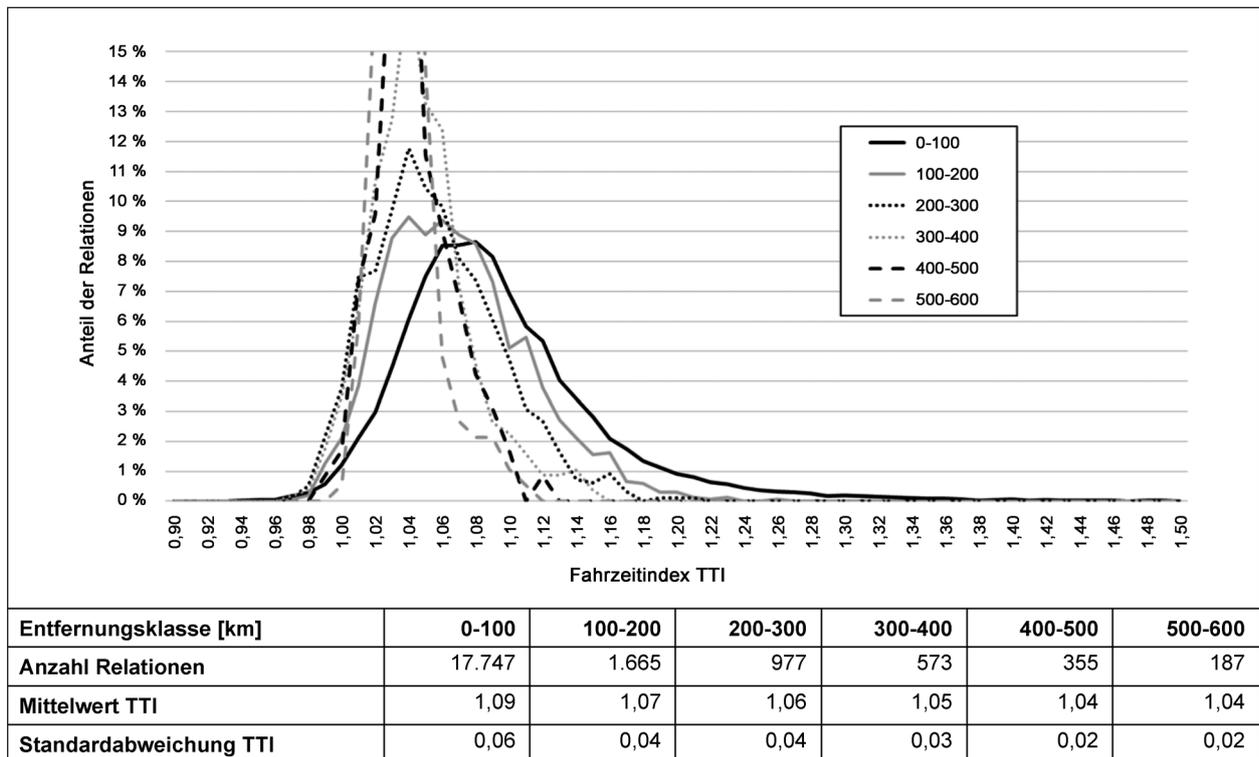


Bild 5-16: Verteilungen des Fahrzeitindex für die Ist-Fahrtzeit (7:00 Uhr,  $p=50\%$ ) für die Datenquelle TomTom differenziert nach sechs Entfernungsklassen

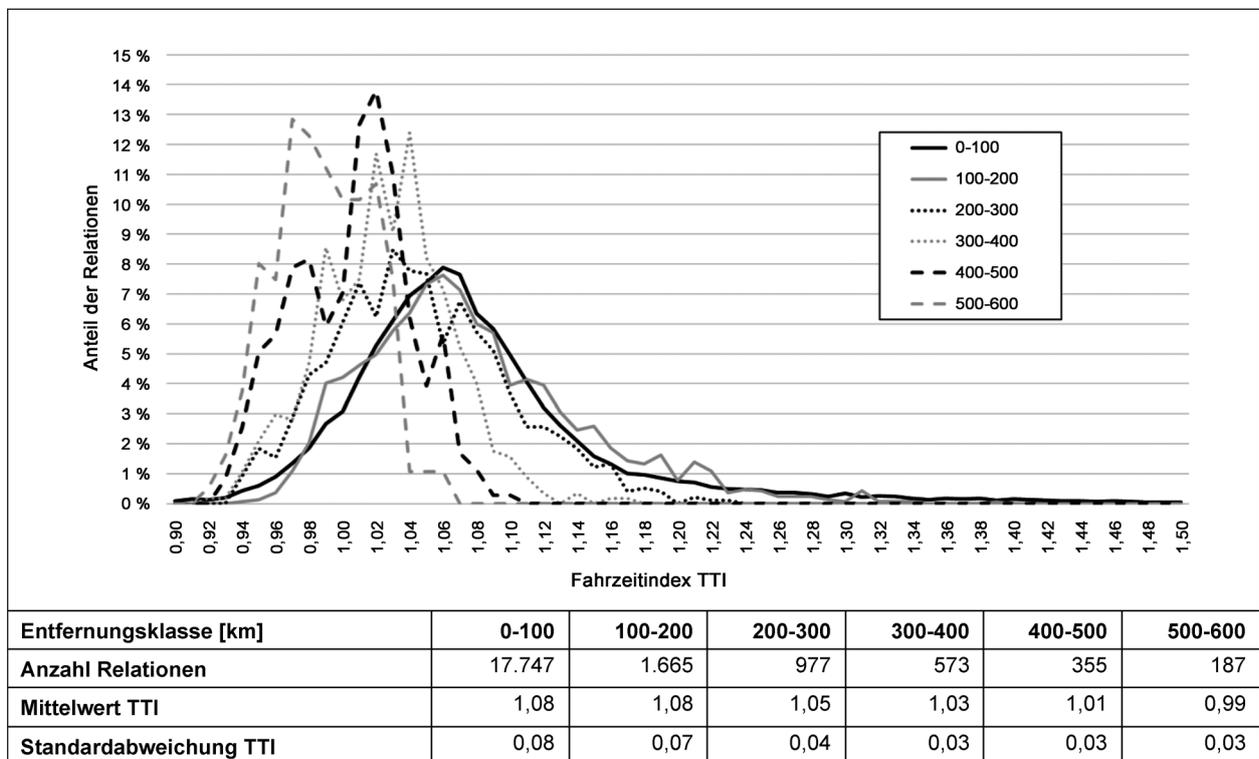


Bild 5-17: Verteilungen des Fahrzeitindex Best-Guess für die Datenquelle Google differenziert nach sechs Entfernungsklassen

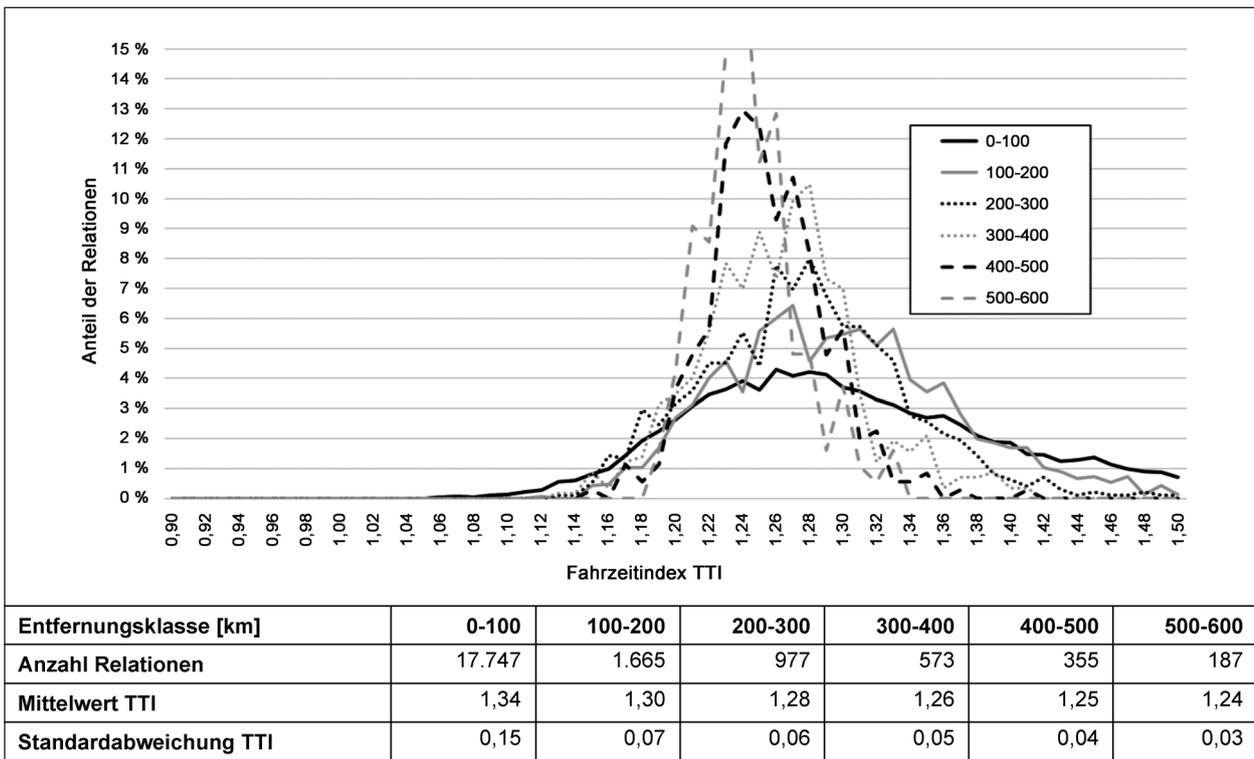


Bild 5-18: Verteilungen des Fahrzeitindex p=75 % für die Datenquelle TomTom differenziert nach sechs Entfernungsklassen

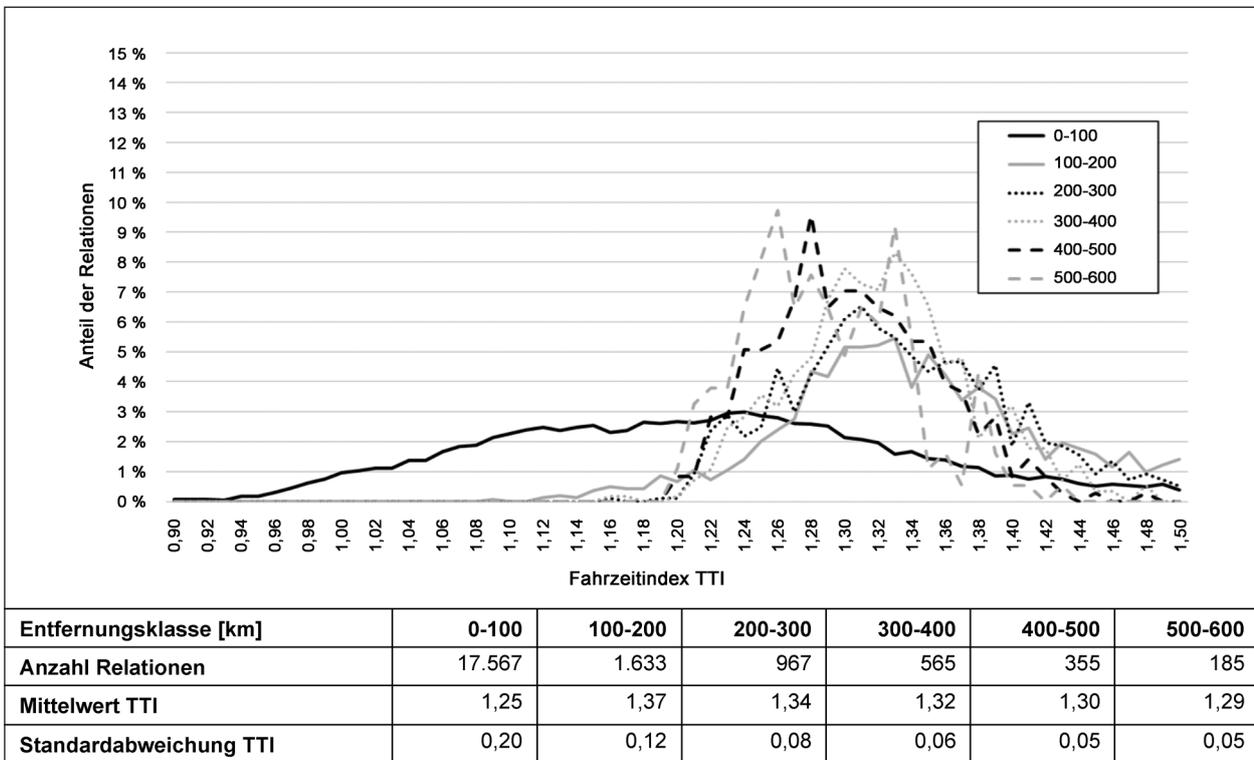


Bild 5-19: Verteilungen des Fahrzeitindex Pessimistic für die Datenquelle Google differenziert nach sechs Entfernungsklassen

## 5.4 Vergleich der Datenquellen auf Streckenebene

Im Folgenden werden Auswertungen der TomTom-Daten auf Streckenebene gezeigt. Für diese Auswertungen wird zum einen die Functional-Road-Class (FRC) genutzt. Da Zeitverluste vor allem in dicht besiedelten Räumen auftreten, wird für die Auswertungen zusätzlich jeder Strecke eine Zentralität zugeordnet. Sie ergibt sich aus der Zentralität der Gemeinde, in der die Strecke liegt (siehe Bild 5-20). Einer Strecke, die in im Kern einer Metropolregion liegt, wird die Zentralität 0 zugeordnet, einer Strecke im Oberzentrum die Zentralität I, die Einteilung erfolgt gemäß Tabelle 4-3.

### 5.4.1 Gewichtung der Fahrtzeiten

Die Auswahl der Relationen basiert auf der RIN-Methodik. In dieser Untersuchung werden dabei vor allem Relationen der Verbindungsfunktionsstufe 0 bis II ausgewählt. Diese Relationen sind für die großräumige Netzgestaltung von besonderer Bedeutung. Sie repräsentieren aber keine typischen Ortsveränderungen in Deutschland. Um den Unterschied zwischen den RIN-Relationen und einer realistischeren Nachfrage darzustellen, werden die TomTom-Hits als Nachfrage bzw. Verkehrsstärke

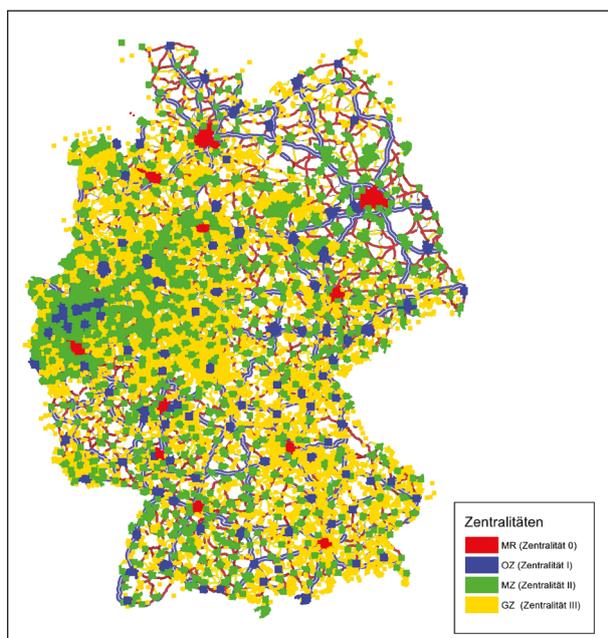


Bild 5-20: TomTom-Netz mit Zentralitäten

interpretiert. Allerdings gilt auch für das TomTom-Netz, dass die ausgewählten Strecken (siehe Tabelle 5-2) vor allem Straßen der FRC 0 und 1 umfassen und deshalb ebenfalls nicht repräsentativ sind. Für den Vergleich werden für jede Strecke drei Kenngrößen berechnet und in Karten dargestellt:

- Anteil der Verkehrsleistung bezogen auf die TomTom-Hits:

Nutzt man die TomTom-Hits  $q_s^{Hits}$  einer Strecke  $s$  als Repräsentant für die Verkehrsnachfrage, dann entspricht das Produkt aus Hits und Streckenlänge  $l$  einer Verkehrsleistung. Für jede Strecke  $s$  kann so der Anteil  $p$  der Verkehrsleistung ausgerechnet werden, der auf diese Strecke entfällt. Bild 5-21 zeigt die resultierenden Anteile.

$$p_s^{Hits} = \frac{l_s \cdot q_s^{Hits}}{\sum_{s \in S} (l_s \cdot q_s^{Hits})}$$

- Anteil der Verkehrsleistung bezogen auf die Umlegung der ausgewählten Relationen:

Die Umlegung der ausgewählten Relationen als 1-er Matrix liefert ebenfalls eine Verkehrsstärke  $q_s^{VFS}$  für jede Strecke  $s$ . Damit kann der Anteil  $p$  der Verkehrsleistung ausgerechnet werden, der

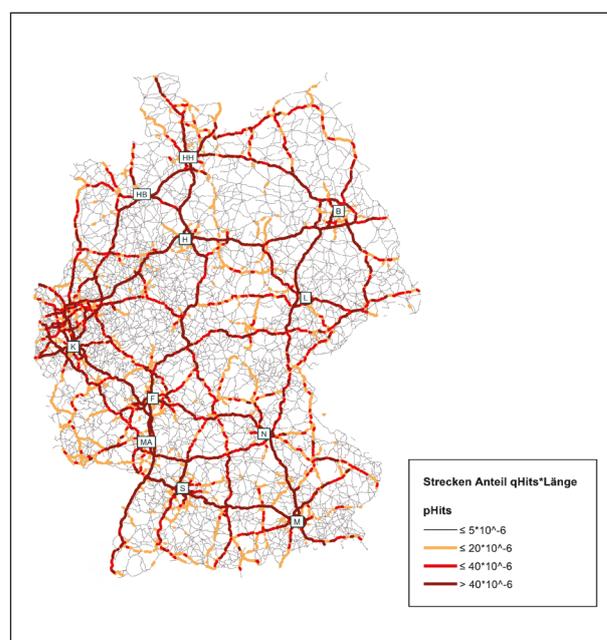


Bild 5-21: Anteil  $p_s^{Hits}$  der Verkehrsleistung je Strecke bezogen auf die TomTom Hits  $q_s^{Hits}$

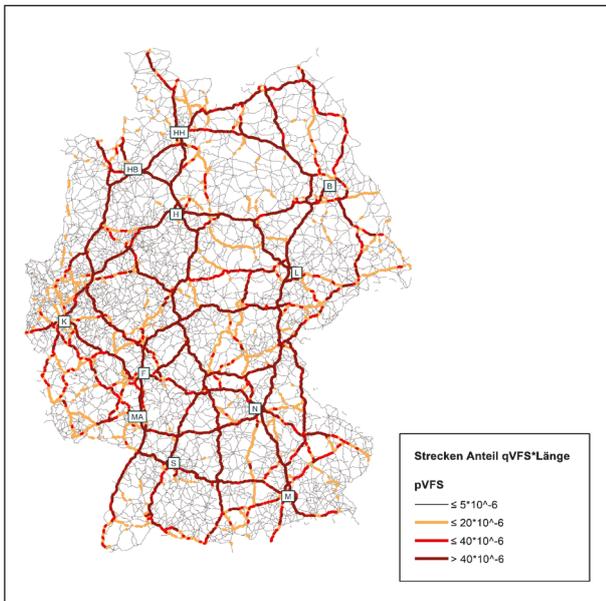


Bild 5-22: Anteil  $p_s^{VFS}$  der Verkehrsleistung je Strecke bezogen auf die VFS-Umlegung  $q_s^{VFS}$

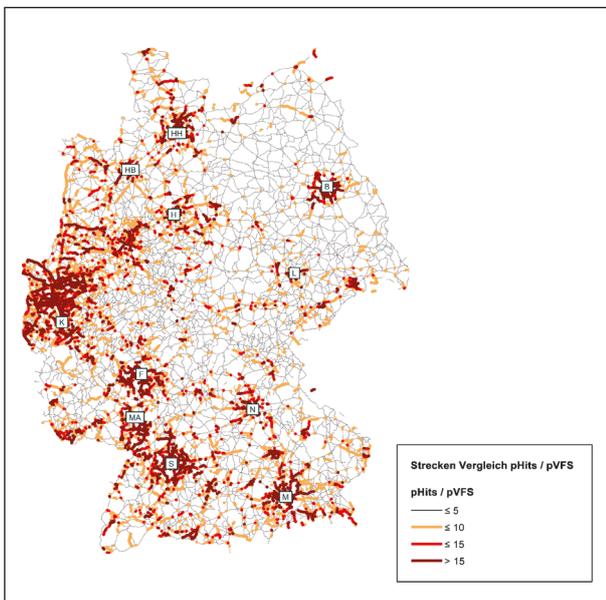


Bild 5-23: Verhältnis von  $p_s^{Hits} / p_s^{VFS}$ . Auf den rot gekennzeichneten Strecken ist der Anteil der realen Nachfrage deutlich höher als der Anteil der Nachfrage der ausgewählten Relationen.

sich für eine Strecke aus der Verbindungsfunktionsstufe ergibt. Bild 5-22 zeigt die resultierenden Anteile.

$$p_s^{VFS} = \frac{l_s \cdot q_s^{VFS}}{\sum_{s \in S} (l_s \cdot q_s^{VFS})}$$

- Verhältnis der Verkehrsleistungsanteile aus TomTom und der VFS-Umlegung:

Bild 5-23 visualisiert das Verhältnis  $p_s^{Hits} / p_s^{VFS}$ .

Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass durch die Auswahl der Relationen die Strecken in Ballungsräumen unterrepräsentiert sind. Das führt dazu, dass die tatsächlichen Verlustzeiten pro Kilometer für eine durchschnittliche Pkw-Fahrt höher sind als für eine durchschnittliche Relation aus der Menge der ausgewählten Relationen.

### 5.4.2 Verlustzeit

Für jede Strecke wird eine Verlustzeit berechnet. Als Soll-Fahrtzeit werden folgende Fahrtzeiten genutzt:

- Perzentil  $p = 50 \%$  der Fahrtzeit um 20:00 Uhr:  $t_{20:00}^{P50}$
- Perzentil  $p = 15 \%$  der Fahrtzeit um 20:00 Uhr:  $t_{20:00}^{P15}$
- Freifahrtgeschwindigkeit:  $t^{Free}$

Im TomTom-Netz gibt es Geschwindigkeitsdaten, die die zulässige Geschwindigkeit oder die Richtgeschwindigkeit überschreiten. Um den Einfluss dieser Überschreitungen auf die Fahrtzeiten quantifizieren zu können, werden bei den Soll-Fahrtzeiten zwei Fälle unterschieden:

- Zulässige Geschwindigkeiten bzw. Richtgeschwindigkeit werden eingehalten. Diese Geschwindigkeit wird durch die Angabe  $v_{zul}$  gekennzeichnet, z. B.  $t_{20:00}^{P50, Vzul}$
- Zulässige Geschwindigkeiten bzw. Richtgeschwindigkeit werden nicht eingehalten

Für die Ist-Fahrtzeiten werden die mittleren Fahrtzeiten  $t_i^{Mean}$  um 07:00 Uhr, 10:00 Uhr, 17:00 Uhr und 20:00 Uhr ausgewertet.

Untersucht werden nur diejenigen Strecken, für die Messwerte (Hits = Zahl der Beobachtungen) vorliegen. Um eine mittlere Verlustzeit pro Kilometer über eine Menge von Strecken (z. B. Strecken je FRC) zu ermitteln, werden die Verlustzeiten mit den Hits gewichtet (= Verlustzeitaufwand) und durch das Produkt aus Hits und Streckenlänge (= Verkehrsleistung) dividiert:

$$t_S^{Delay/km} = \frac{\sum_{s \in S} \text{MAX}(t_s^{Curr} - t_s^{Target}, 0) \cdot q_s^{Hits}}{\sum_{s \in S} (l_s \cdot q_s^{Hits})}$$

mit

$t_S^{Delay/km}$  mittlere Verlustzeit pro Kilometer für die Streckenmenge  $S$

$t_s^{Curr}$  Ist-Fahrtzeit der Strecke  $s$  [in Sekunden]

$t_s^{Target}$  Soll-Fahrtzeit der Strecke  $s$  [in Sekunden]

$q_s^{Hits}$  TomTom-Hits der Strecke  $s$

$l_s$  Länge der Strecke  $s$  [in Kilometer]

$S$  Menge der Strecken

In Anlage 4 sind die mittlere Verlustzeit pro Kilometer im Pkw-Verkehr für vier Tageszeiten und für drei Soll-Fahrtzeiten ausgewiesen. Das führt zu 12 Tabellen. In jeder der 12 Tabellen werden die Verlustzeiten mit und ohne Einhaltung der zulässigen Geschwindigkeit ausgewiesen. Dabei wird differenziert nach

- Functional-Road-Class FRC 0 bis 7 und
- Lage der Strecke in einer Gemeinde der Zentralität 0 bis III und > III.

Bild 5-24 stellt die mittleren Verlustzeiten über alle Strecken pro Kilometer für jede der 24 Ausprägungen (4 Tageszeiten, 3 Soll-Fahrtzeiten,  $v_{zul} = \text{ja/nein}$ ) in einem Diagramm dar. Bild 5-25 bezieht die Verlustzeiten auf jährliche Zeiten pro Pkw-Nutzer. Die Ergebnisse zeigen folgende Zusammenhänge:

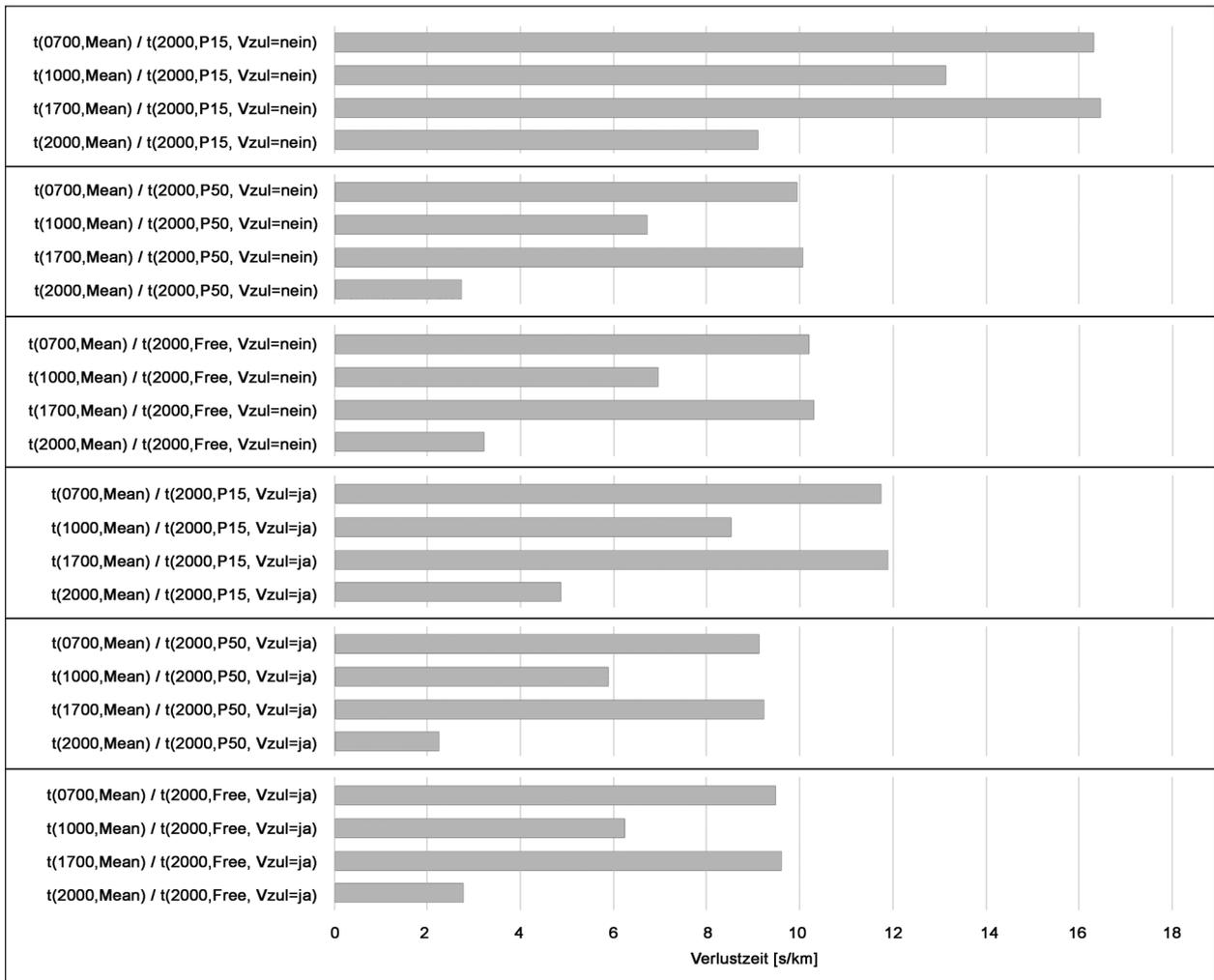


Bild 5-24: Mittlere Verlustzeiten pro Kilometer [s/km] im Pkw-Verkehr für die Ist-Fahrtzeitausprägungen  $t^{Mean}$  und die Soll-Fahrtzeitausprägungen  $t_{20:00}^{P15}$ ,  $t_{20:00}^{P50}$ ,  $t^{Free}$ . Die Verlustzeiten sind nach der Soll-Fahrtzeit sortiert.

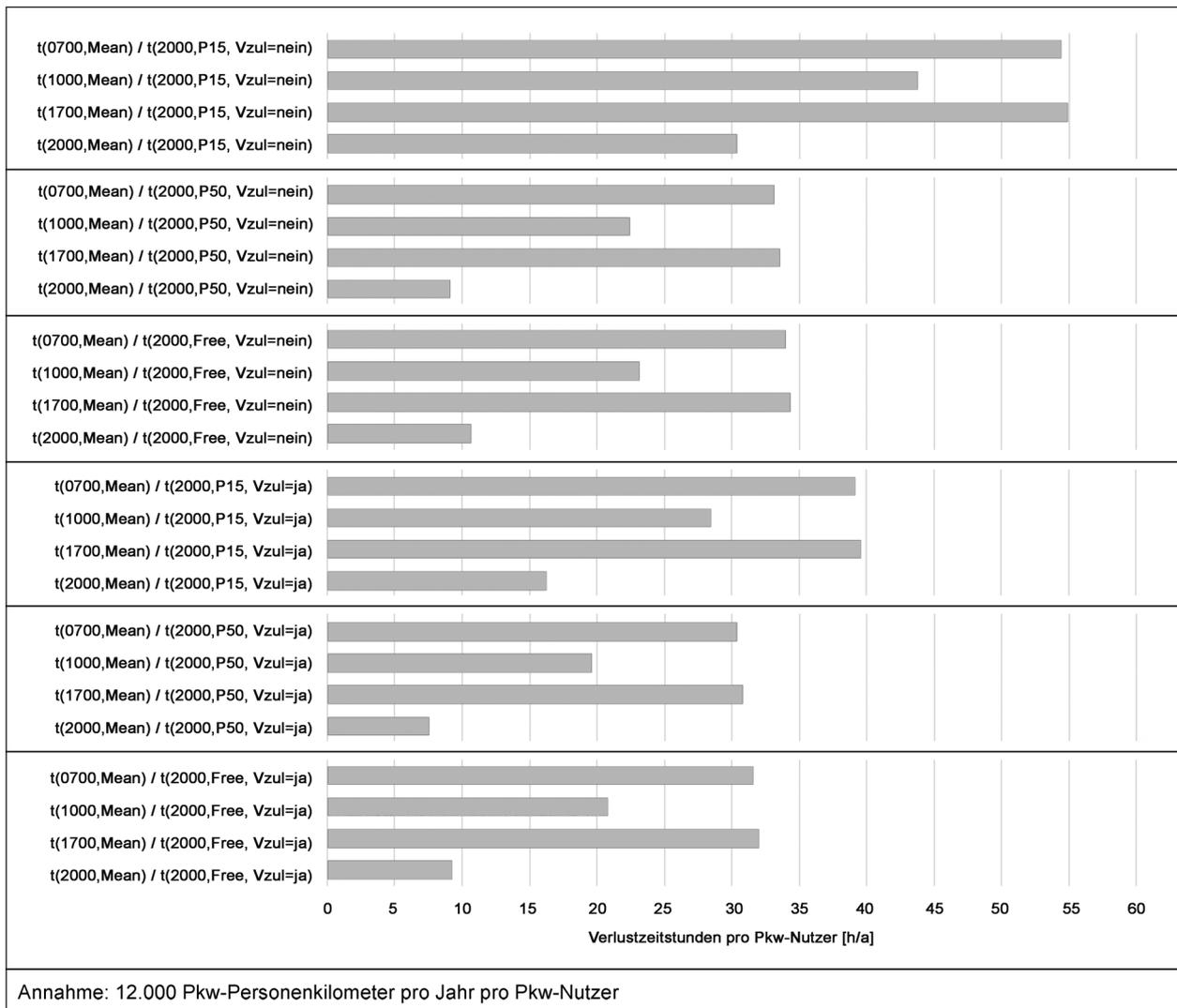
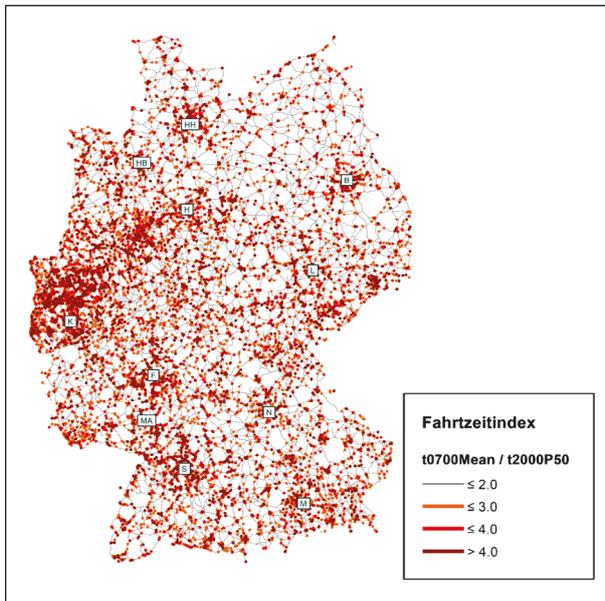
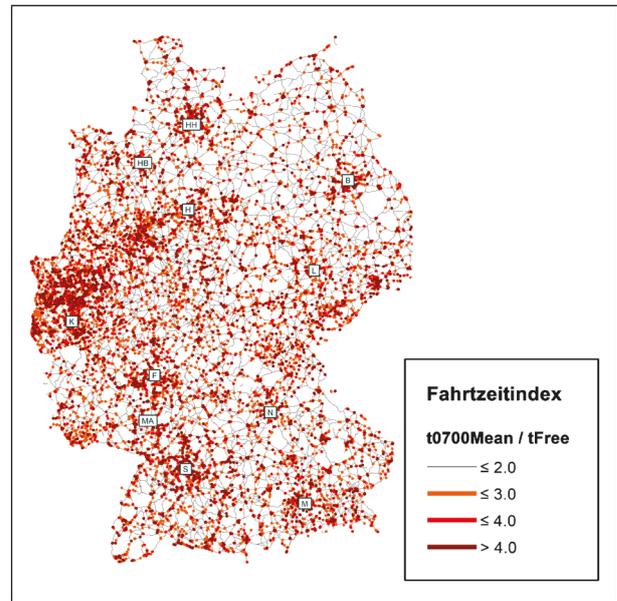
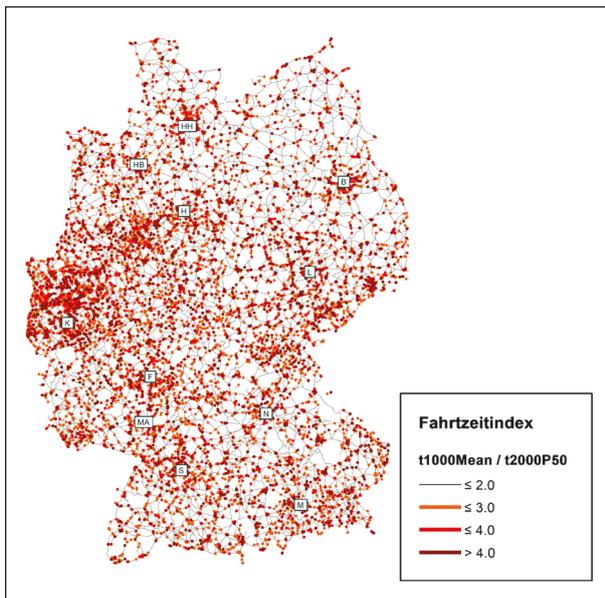
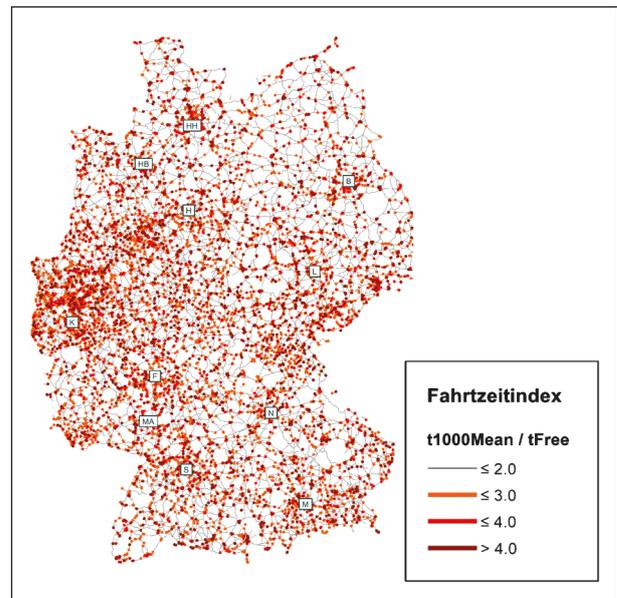


Bild 5-25: Mittlere jährliche Verlustzeiten pro Pkw-Nutzer [h/a] für die Ist-Fahrtzeitausprägungen  $t^{Mean}$  und die Soll-Fahrtzeitausprägungen  $t_{20:00}^{P15}$ ,  $t_{20:00}^{P50}$ ,  $t^{Free}$ . Die Verlustzeiten sind nach der Soll-Fahrtzeit sortiert.

- Die Berücksichtigung der zulässigen Geschwindigkeit hat einen Einfluss auf die Verlustzeit. Das gilt besonders bei der Soll-Fahrtzeit  $t_{20:00}^{P15}$ , da hier die zulässige Geschwindigkeit häufig überschritten wird. Bei der Soll-Fahrtzeit  $t^{Free}$  und  $t_{20:00}^{P50}$  ist der Einfluss klein.
- Die Verlustzeit hängt von der Soll-Fahrtzeit ab. Bei der Soll-Fahrtzeit  $t_{20:00}^{P15}$  ist die Verlustzeit am höchsten, bei  $t^{Free}$  und  $t_{20:00}^{P50}$  liegt sie deutlich niedriger. Der Unterschied ist größer, wenn die Einhaltung der zulässigen Geschwindigkeit nicht geprüft wird.
- Die Verlustzeit steigt mit der FRC.
- Die Verlustzeit steigt mit der Zentralität des Ortes, in dem die Strecke liegt.
- Die Verlustzeit steigt abhängig von der Tageszeit in folgender Reihenfolge 20:00, 10:00, 07:00 und 17:00 Uhr. Die Unterschiede zwischen der Hauptverkehrszeit (07:00 und 17:00 Uhr) und der Nebenverkehrszeit (10:00 Uhr) sind größer als bei den relationsbezogenen Fahrtzeiten.

### 5.4.3 Fahrtzeitindex

Die folgenden Schaubilder zeigen den Fahrtzeitindex für die Datenquelle TomTom in vier verschiedenen Ausprägungen. Die Soll-Fahrtzeit wird aus dem 50%-Perzentil des SVZ und den Freifahrtgeschwindigkeit abgeleitet. Für die Ist-Fahrtzeiten werden die mittleren Fahrtzeiten  $t_i^{Mean}$  um 07:00 Uhr und um 10:00 Uhr ausgewertet:

Bild 5-26: Fahrtzeitindex für  $t_{07:00}^{Mean} / t_{20:00}^{P50}$ Bild 5-28: Fahrtzeitindex für  $t_{07:00}^{Mean} / t^{Free}$ Bild 5-27: Fahrtzeitindex für  $t_{10:00}^{Mean} / t_{20:00}^{P50}$ Bild 5-29: Fahrtzeitindex für  $t_{10:00}^{Mean} / t^{Free}$ 

- Fahrtzeitindex TomTom:  $f_{DQ=TomTom,i=7:00}^{TTI,Mean} = \frac{t_{7:00}^{Mean}}{t_{20:00}^{P50}}$
- Fahrtzeitindex TomTom:  $f_{DQ=TomTom,i=10:00}^{TTI,Mean} = \frac{t_{10:00}^{Mean}}{t_{20:00}^{P50}}$
- Fahrtzeitindex TomTom:  $f_{DQ=TomTom,i=7:00}^{TTI,Mean} = \frac{t_{7:00}^{Mean}}{t^{Free}}$
- Fahrtzeitindex TomTom:  $f_{DQ=TomTom,i=10:00}^{TTI,Mean} = \frac{t_{10:00}^{Mean}}{t^{Free}}$

Die Schaubilder zeigen, wie auch schon die Verlustzeiten in Kapitel 5.4.2, einen Unterschied zwischen den 07:00 Uhr und den 10:00 Uhr Werten. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die höchsten Fahrtzeitindizes, wie erwartet, im Bereich der Metropolregionen und der Oberzentren auftreten. Der Unterschied zwischen den Soll-Fahrtzeiten  $t_{20:00}^{P50}$  und  $t^{Free}$  fällt hingegen eher schwach aus.

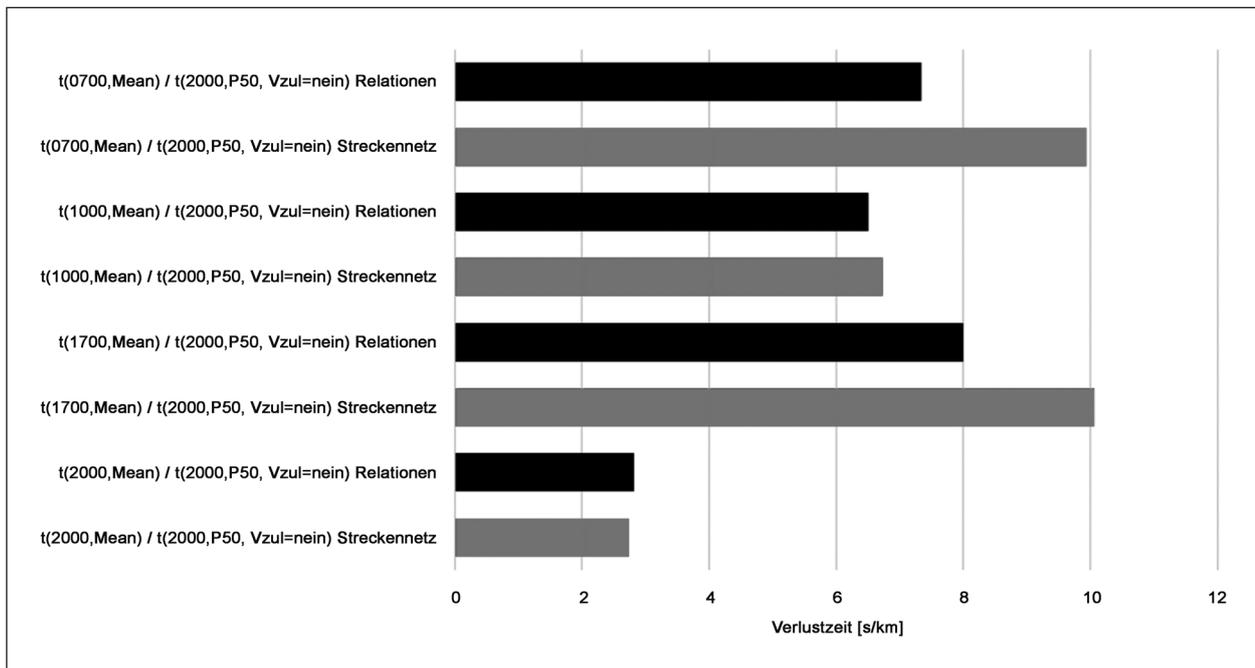


Bild 5-30: Vergleich der mittleren Verlustzeiten pro Kilometer [s/km] im Pkw-Verkehr für die ausgewählten Relationen und das Streckennetz für die Ist-Fahrtzeitausprägungen  $t^{Mean}$  und die Soll-Fahrtzeitausprägungen  $t_{20:00}^{P50}$ . Die Verlustzeiten sind nach der Tageszeit sortiert.

## 5.5 Vergleich der Verlustzeiten für das Streckennetz und die ausgewählten Relationen

In Kapitel 5.3.2 sind die mittleren Verlustzeiten für die ausgewählten Relationen dargestellt. In Kapitel 5.4.2 sind die mittleren Verlustzeiten – gewichtet mit den TomTom-Hits – für den Teil des Straßennetz ausgewiesen, für das im Rahmen des Projekts TomTom-Daten verfügbar sind (siehe Tabelle 5-2). Für die Ist-Fahrtzeitausprägungen  $t_{07:00}^{Mean}$ ,  $t_{10:00}^{Mean}$ ,  $t_{17:00}^{Mean}$ ,  $t_{20:00}^{Mean}$  und die Soll-Fahrtzeitausprägung  $t_{20:00}^{P50}$  werden die Verlustzeiten in Bild 5-30 verglichen. Der Vergleich zeigt, dass die mittleren Verlustzeiten in der Hauptverkehrszeit höher sind, wenn man die Werte aus dem Streckennetz ableitet und mit den Hits gewichtet. In der Nebenverkehrszeit sind die Unterschiede klein.

## 6 Konzept zur Vergleichbarkeit der Datenquellen

Das Konzept zur Vergleichbarkeit der Datenquellen geht davon aus, dass die Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität für die Kenngröße Luftliniengeschwindigkeit mit den in Kapitel 7 ermittelten Bewertungsfunktionen<sup>2</sup> erfolgt. Ausgangspunkt ist eine RIN-Anwendung, in der Fahrt- bzw. Reisezeitdaten aus einer beliebigen Datenquelle für die Bewertung der Angebotsqualität genutzt werden sollen. Den RIN-Anwendenden soll eine praktikable Methode angeboten werden, die eine Einordnung der Fahrtzeitdaten ihrer Datenquelle ermöglicht. Den RIN-Anwendenden werden hierfür die in diesem Projekt ermittelten Fahrtzeitdaten als Referenzfahrtzeitdaten zur Verfügung gestellt. Diese Referenzdatenquelle enthält für jede der 21.582 Relationen die Luftlinienentfernung und die Reisezeiten (siehe Tabelle 13-1). Des Weiteren werden die aus diesen Daten in Kapitel 7 geschätzten Bewertungsfunktionen bereitgestellt.

<sup>2</sup> Für den Begriff Bewertungsfunktion wird im Folgenden der kürzere Begriff SAQ-Kurve verwendet (siehe auch Glossar).

Um die Vergleichbarkeit einer beliebigen Datenquelle  $Q_A$  – im Folgenden als Analysedatenquelle bezeichnet – und der Referenzdatenquelle  $Q_R$  zu überprüfen, wird ein zweistufiges Vorgehen vorgeschlagen:

1. Validierung der Analysedatenquelle: Es wird die Übereinstimmung der Fahrtzeitdaten verglichen. Für diesen Vergleich werden die SAQ-Werte herangezogen.
2. Anpassung der Analysefahrtzeitdaten: Falls die Validierung der Analysedatenquelle eine unzureichende Übereinstimmung der Datenquellen ergibt, dann können die Analysefahrtzeitdaten für die RIN-Bewertung angepasst werden.

In diesem Kapitel werden als Referenzdatenquelle nicht die Daten der RIN (2008) genutzt, sondern die aus den TomTom-Daten abgeleiteten Fahrtzeiten (Zeitraum 07:00 Uhr, 50%-Perzentil). Mit diesen Daten wurden – im Vorgriff auf Kapitel 7 – Bewertungsfunktionen analog zu den RIN (2008) geschätzt. Als Analysedatenquelle werden exemplarisch die mit Google ermittelten Fahrtzeiten (Zeitraum 07:00 Uhr, Best-Guess) genutzt.

## 6.1 Validierung der Fahrtzeitdaten einer Datenquelle

Die RIN (2008) bietet für die Bewertung der Luftliniengeschwindigkeit eine Bewertungsfunktion, die in Bild 7-1 dargestellt ist. Für diese Bewertungsfunktionen werden 5 Parametersätze bereitgestellt, die eine Einstufung der Luftliniengeschwindigkeit in 6 Stufen der Angebotsqualität A bis F ermöglichen. Diese SAQ-Kurven werden im Folgenden nach den Bewertungsstufen benannt, die von der Kurve getrennt werden:

- Die SAQ-Kurve A/B trennt die Stufen der Angebotsqualität A und B.
- Die SAQ-Kurve B/C trennt die Stufen der Angebotsqualität B und C.
- Die SAQ-Kurve C/D trennt die Stufen der Angebotsqualität C und D.
- Die SAQ-Kurve D/E trennt die Stufen der Angebotsqualität D und E.
- Die SAQ-Kurve E/F trennt die Stufen der Angebotsqualität E und F.

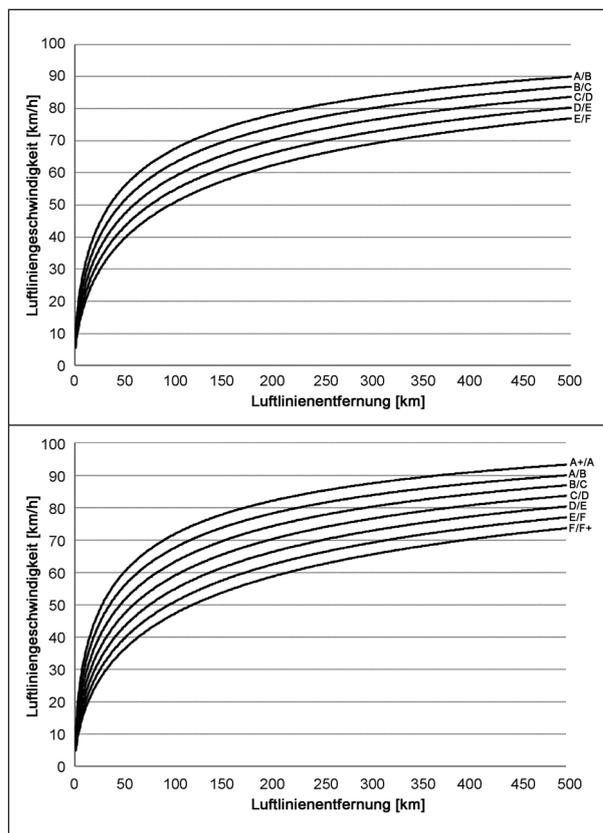


Bild 6-1: SAQ-Referenzkurven der Luftliniengeschwindigkeit (Diagramm oben), erweitert um zwei weitere SAQ-Kurven A+/A und F+/F+ (Diagramm unten).

Diese 5 SAQ-Kurven sind in Bild 6-1 (oben) dargestellt. Die dargestellten Kurven entsprechen nicht den in den RIN (2008) veröffentlichten Kurven, sondern (vorläufigen) Kurven, die mit den TomTom-Fahrtzeiten geschätzt wurden.

Für die Validierung der Analysedatenquelle werden die fünf SAQ-Kurven der RIN um zwei weitere SAQ-Kurven A+ und F+ erweitert, die in Bild 6-1 (unten) als fett markierte Kurven erkennbar sind. Sie werden wie folgt bezeichnet:

- Die SAQ-Kurve A+/A trennt die Stufen der Angebotsqualität A+ und A.
- Die SAQ-Kurve F+/F+ trennt die Stufen der Angebotsqualität F und F+.

Mit diesen beiden SAQ-Kurven sollen Bereiche der Angebotsqualität abgedeckt werden, die entweder sehr gut oder sehr schlecht sind, in der Realität aber auftreten können. Relationen, die sich oberhalb von SAQ = A+ oder unterhalb von SAQ = F+ befinden, beschreiben Zustände, die in der Realität nicht oder nur selten auftreten. Die Parameter der SAQ-Kurven sind in Tabelle 6-1 angegeben.

Parameter	A+/A	A/B	B/C	C/D	D/E	E/F	F/F+
a	0.092	0.1100	0.1300	0.1560	0.1860	0.2190	0.257
b	-0.6480	-0.6480	-0.6480	-0.6480	-0.6480	-0.6480	-0.6480
c	0.0091	0.0092	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093

Tab. 6-1: Parameter der SAQ-Funktionen

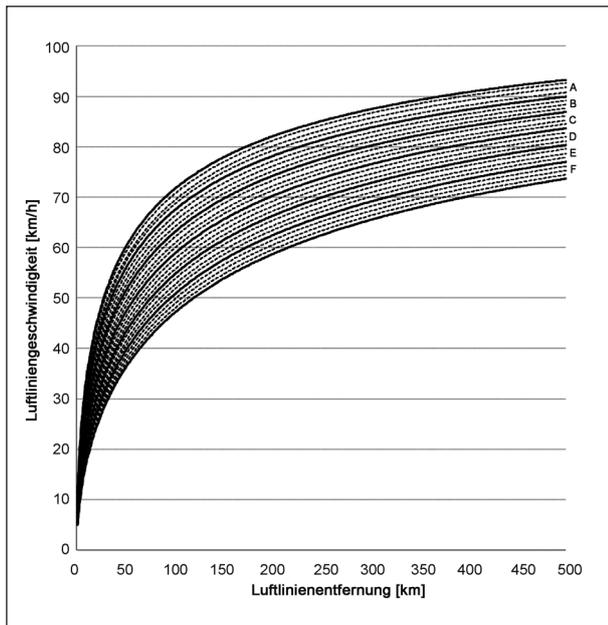


Bild 6-2: Referenzkurven mit gleichabständigen Unterklassen

Mit den 7 SAQ-Kurven können nun für jede SAQ gleichabständige Unterklassen erstellt werden. Wählt man hierfür vier Unterklassen sind, – wie in Bild 6-2 gezeigt – jeweils drei weitere SAQ-Kurven erforderlich. Die Unterklassen weisen jeweils gleiche Abstände zur nächsten Unter- bzw. Oberklasse auf. Auf diese Weise entstehen 25 SAQ-Kurven ( $7 + 6 \times 3 = 25$ ), die in Bild 6-2 dargestellt sind. Diese 25 SAQ-Kurven definieren 24 SAQ-Bereiche, die von jeweils zwei SAQ-Kurven begrenzt werden. Sie werden mit den Kennungen A1, A2, A3, A4, B1, B2, ..., F1, F2, F3 und F4 bezeichnet. Der Bereich oberhalb der SAQ-Kurve A+/A wird als A+ bezeichnet, der Bereich unterhalb der SAQ-Kurve F/F+ als F+. Die feinere Unterteilung ermöglicht genauere Aussagen zu den Abweichungen bei den SAQ-Werten zwischen der Analyse- und der Referenzdatenquelle.

Um eine Analysedatenquelle zu validieren, muss in einem ersten Schritt die Menge der übereinstimmenden Relationen bestimmt werden. Diese Filterung kann beispielsweise über den AGS (Amtlichen Gemeindeschlüssel) erfolgen. Dieser wird für die 21.582 Relationen zur Verfügung gestellt. Ziel ist

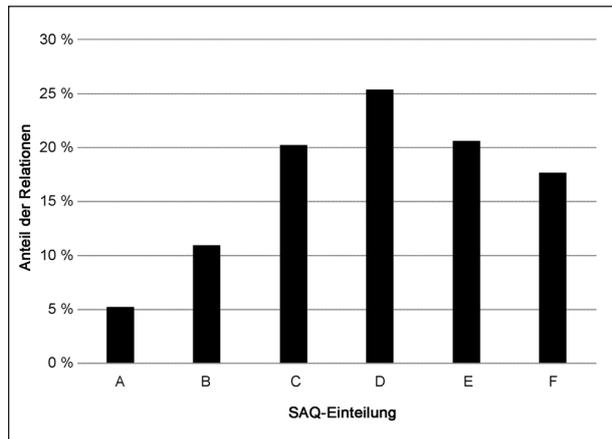


Bild 6-3: Häufigkeit der Stufen der Angebotsqualität der Analysedatenquelle bei der Verwendung von 6 SAQ-Kurven A – F

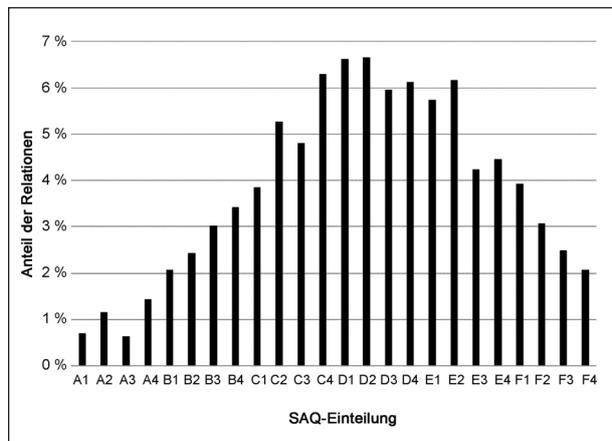


Bild 6-4: Häufigkeit der Stufen der Angebotsqualität der Analysedatenquelle bei der Verwendung von 24 SAQ-Kurven A1 – F4

es, nur die Relationen miteinander zu vergleichen, die sowohl in der Analysedatenquelle als auch in der Referenzdatenquelle enthalten sind.

In einem zweiten Schritt wird die Übereinstimmung der Fahrtzeitdaten von Referenzdatenquelle und Analysedatenquelle auf der Ebene der SAQ-Werte ermittelt. Bild 6-3 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Bewertung der Fahrtzeiten aus der Analysedatenquelle Google bei der Verwendung von 6 SAQ-Stufen, Bild 6-4 bei der Verwendung von 24 SAQ-Stufen. Bei einer guten Übereinstimmung der Ana-

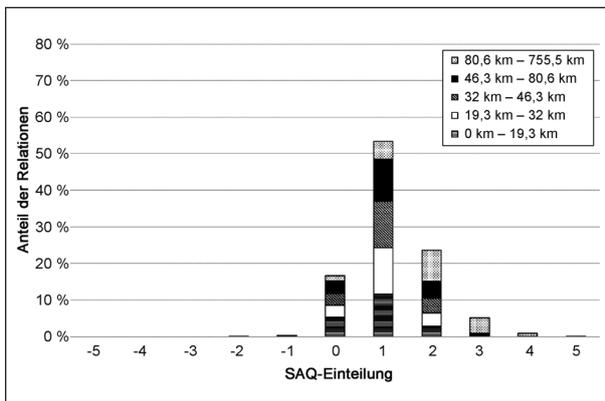


Bild 6-5: Abweichung der SAQ-Werte der Analysedatenquelle von der Referenzdatenquelle bei der Verwendung von 6 SAQ-Stufen A – F. Die fünf Entfernungsklassen sind so gewählt, dass jede Klasse die gleiche Anzahl von Relationen enthält.

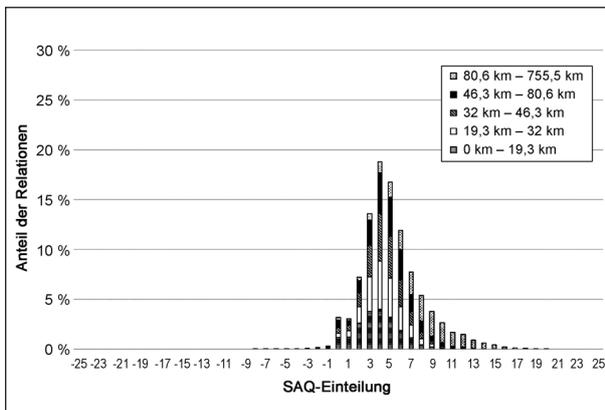


Bild 6-6: Abweichung der SAQ-Werte der Analysedatenquelle von der Referenzdatenquelle bei der Verwendung von 24 SAQ-Stufen A1 – F4. Die fünf Entfernungsklassen sind so gewählt, dass jede Klasse die gleiche Anzahl von Relationen enthält.

lyse- und der Referenzdatenquelle ist zu erwarten, dass etwa 50 % der Relationen in die Qualitätsstufen A oder B fallen.

In Bild 6-5 und Bild 6-6 sind dann die Abweichungen der Datenquellen dargestellt. Bei der Verwendung von 6 Stufen lassen sich bei etwa 55 % der Relationen Abweichungen um +1 Stufe erkennen. Bei etwa 15 % der Relationen ergeben sich übereinstimmende Bewertungen, bei den restlichen 30 % sind die Abweichungen größer als eine Stufe. Bei der Verwendung von 24 Stufen ist erkennbar, dass sich die meisten Abweichungen im Bereich +1 bis +6 bewegen. Die Analysedatenquelle liefert demnach in den meisten Fällen langsamere Fahrtzeiten und damit schlechtere Bewertungen.

Im Idealfall ergibt die Methode eine gute Übereinstimmung mit den Fahrtzeitdaten der Referenzda-

tenquelle. Um die Übereinstimmung zu quantifizieren, wird vorgeschlagen, die mittlere quadratische Abweichung der SAQ-Werte bei Verwendung der 24-stufigen Skala zu ermitteln:

$$g = \frac{\sum_{r \in R} \sqrt{(SAQ_{r \in Q_R} - SAQ_{r \in Q_A})^2}}{|R|}$$

mit

$g$  Abstandsmaß

$r \in R$  Menge  $R$  der übereinstimmenden Relationen  $r$

$|R|$  Anzahl der Relationen

$SAQ_{r \in Q_R}$  SAQ-Wert der Relation  $r$  für die Referenzdatenquelle  $1 \leq SAQ \leq 24$

$SAQ_{r \in Q_A}$  SAQ-Wert der Relation  $r$  für die Analysedatenquelle  $1 \leq SAQ \leq 24$

Eine ausreichende Übereinstimmung kann nun normativ gesetzt werden. Geht man davon aus, dass eine ausreichende Übereinstimmung dann gegeben ist, wenn eine Bewertung nach RIN im Mittel um weniger als einen halben SAQ-Wert abweicht, dann sollte ein maximaler Wert für das Abstandsmaß auf 1,5 oder 2,0 gesetzt werden:

- $g \leq g_{max} = 2,0$  : Übereinstimmung ausreichend, keine Fahrtzeitkorrektur erforderlich.
- $g > g_{max} = 2,0$  : Übereinstimmung nicht ausreichend, Fahrtzeitkorrektur erforderlich.

Im hier gewählten Beispiel ist in Bild 6-6 eine deutliche Abweichung der SAQ-Werte nach rechts zu erkennen, d. h. die Fahrtzeiten der Analysedatenquelle sind zu hoch. Die Summe der quadratischen Abweichung liegt bei einem Wert von 111.844 bei voller Relationsanzahl von 21.582. Dies ergibt ein Abweichungsmaß von 5,2 und ist somit deutlich zu hoch. Die Daten sollten deshalb angepasst werden, damit eine Bewertung mit den Referenzkurven möglich ist.

### 6.2 Anpassung der Fahrtzeitdaten

Die Anpassung der Fahrtzeiten erfolgt über folgende Funktion:

$$t_{r \in Q_A}^* = f_1 \cdot t_{r \in Q_A} + f_2 + f_3 \cdot l_r^{Luft}$$

mit

$t_{r \in Q_A}^*$  Fahrtzeit der Relation  $r$  nach der Anpassung [min]

$t_{r \in Q_A}$  Fahrtzeit der Relation  $r$  für die Analysedatenquelle vor der Anpassung [min]

$l_r^{Luft}$  Luftlinienentfernung Relation  $r$  [km]

$f_1, f_2, f_3$  Anpassungsparameter (für alle Relationen konstant)

Es gilt die Anpassungsparameter  $f_1, f_2$  und  $f_3$  so zu bestimmen, dass das Abstandsmaß  $g$  minimal wird. Die Bestimmung der Anpassungsparameter kann über einen Optimierungsalgorithmus wie beispielsweise die „Solver-Funktion“ in Excel gelöst werden oder durch gezieltes Absuchen eines Wertebereiches für alle f-Parameterkombinationen. Für die Ermittlung der Anpassungsparameter können die in Tabelle 6-2 dargestellten Werte genutzt werden.

In den Bildern 6-7 und 6-8 werden die Ergebnisse der Anpassung für die Analysedatenquelle dargestellt. Im gewählten Beispiel ergibt sich vor der Fahrtzeitkorrektur ein Abweichungsmaß von 5,2 und nach der Korrektur ein Abweichungsmaß von 1,5. Durch diese Anpassung ist es möglich, die Fahrtzeitdaten der Analysedatenquelle und die daraus abgeleiteten Qualitätsstufen mit der Referenzdatenquelle zu harmonisieren. Auf diese Weise können Fahrtzeitdaten aus verschiedenen empirischen Datenquellen und Verkehrsnachfragemodel-

	von	bis	Schrittweite
$f_1$	0,5	2,0	0,01
$f_2$	-20	20	0,10
$f_3$	-0,4	0,4	0,01

Tab. 6-2: Empfohlene Suchbereiche und Schrittweiten für die Anpassungsparameter  $f_1$ - $f_3$

len für eine Bewertung der Angebotsqualität genutzt werden.

Durch die Änderung der Fahrtzeiten, ändern sich auch die mit der Analysedatenquelle durchgeführten Bewertungen (Bild 6-3 und Bild 6-4) mittels der SAQ-Kurven. Diese Neueinteilung ist in Bild 6-9 und Bild 6-10 dargestellt. Nun entfallen fast 50 % der Relationen in die Qualitätsstufen A und B.

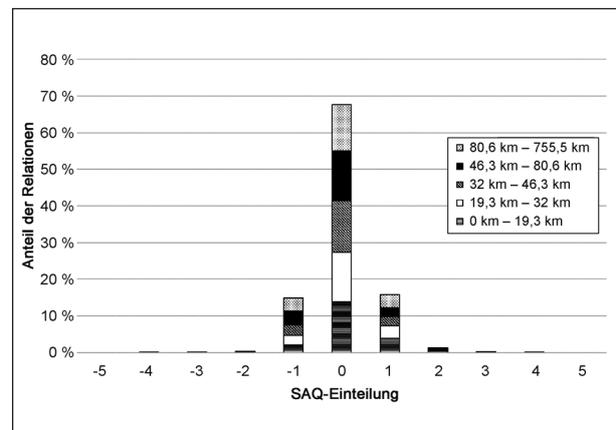


Bild 6-7: Abweichung der SAQ-Werte mit Fahrtzeitkorrektur ( $f_1 = 0,91; f_2 = 0,1; f_3 = -0,02$ ; Abweichungsmaß = 1,5) bei der Verwendung von 6 SAQ-Stufen A – F. Die fünf Entfernungsklassen sind so gewählt, dass jede Klasse die gleiche Anzahl von Relationen enthält.

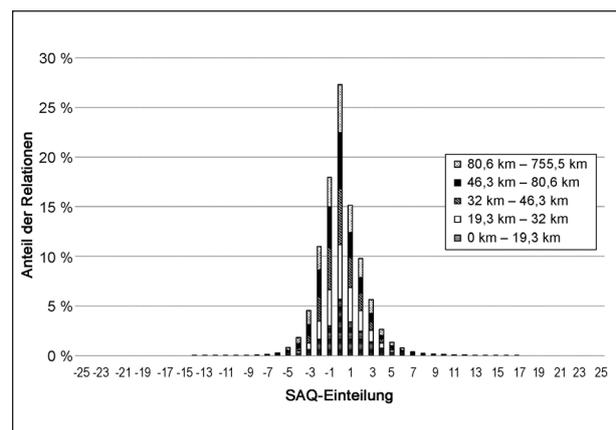


Bild 6-8: Abweichung der SAQ-Werte mit Fahrtzeitkorrektur ( $f_1 = 0,91; f_2 = 0,1; f_3 = -0,02$ ; Abweichungsmaß = 1,5) bei der Verwendung von 24 SAQ-Stufen A1 – F4. Die fünf Entfernungsklassen sind so gewählt, dass jede Klasse die gleiche Anzahl von Relationen enthält.

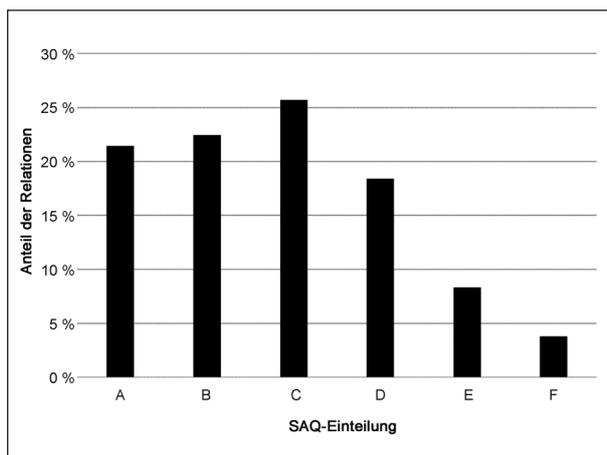


Bild 6-9: Einteilung der Datenquelle in SAQ-Werte A – F nach der Fahrtzeitkorrektur

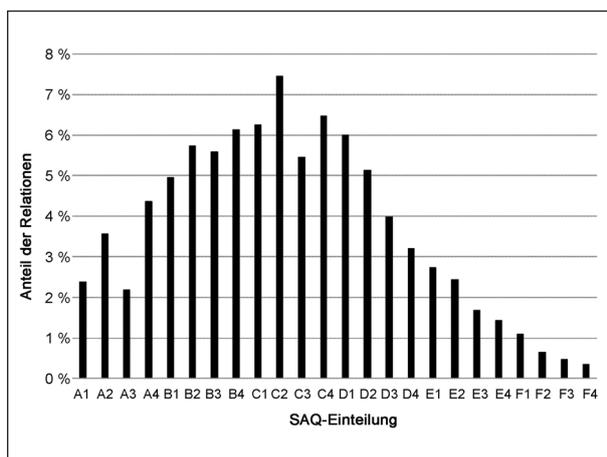


Bild 6-10: Einteilung der Datenquelle in SAQ-Werte A1 – F4 nach der Fahrtzeitkorrektur

### 6.3 Konzepttest an Fahrtzeitausprägungen verschiedener Datenquellen

Das oben beschriebene Verfahren zur Validierung einer Datenquelle und zur Anpassung der Fahrtzeiten über die in Kapitel 6.2 beschriebene Funktion wird im Folgenden anhand verschiedener Fahrtzeitausprägungen der beiden Datenquellen getestet und dargestellt. Die Referenz-Analysedatenquellen wurden so gewählt, dass jeweils verschiedene Datenanbieter miteinander verglichen werden. Außerdem wurden die Datenquellen so ausgewählt, dass „ähnliche“ Fahrtzeitausprägungen miteinander verglichen werden. Das Konzept wird für folgende (siehe Tabelle 6-3) Kombinationen aus Referenz- und Analysedatenquellen getestet.

In den folgenden Tabellen sind die berechneten Abstandsmaße für die beschriebenen Vergleiche ersichtlich. Das Abweichungsmaß  $g$  wird zusätzlich in eine positive und eine negative Abweichung der Analysedatenquelle von der Referenzdatenquelle unterteilt:

- Bei der positiven Abweichung  $g^+$  werden lediglich die Relationen betrachtet, bei denen der SAQ-Wert der Referenzdatenquelle niedriger ist als der SAQ-Wert der Analysedatenquelle. Hier sind die Fahrtzeiten der Referenzdatenquelle niedriger:

$$g^+ = \frac{\sum_{r \in R} \sqrt{\left( \text{MAX}(SAQ_{r \in Q_A} - SAQ_{r \in Q_R}, 0) \right)^2}}{|R|}$$

Kombination	Referenzdatenquelle			Analysedatenquelle		
	Datenquelle	Fahrtzeitausprägung		Datenquelle	Fahrtzeitausprägung	
1	TomTom	07:00 Uhr	50%-Perzentil	Google	Mo-Fr 07:00 Uhr	Best-Guess
2	TomTom	07:00 Uhr	Mittelwert	Google	Mo-Fr 07:00 Uhr	Best-Guess
3	TomTom	07:00 Uhr	75%-Perzentil	Google	Di 07:00 Uhr	Pessimistic
4	TomTom	07:00 Uhr	75%-Perzentil	Validate		belastet
5	TomTom	07:00 Uhr	90%-Perzentil	Google	Di 07:00 Uhr	Pessimistic
6	TomTom	07:00 Uhr	90%-Perzentil	Validate		belastet
7	TomTom	20:00 Uhr	50%-Perzentil	Google	Di 20:00 Uhr	Optimistic
8	TomTom	20:00 Uhr	50%-Perzentil	Validate		unbelastet

Tab. 6-3: Getestete Kombinationen von Fahrtzeitausprägungen der Referenz- und Analysedatenquellen

- Bei der negativen Abweichung  $g^-$  werden lediglich die Relationen betrachtet, bei denen der SAQ-Wert der Referenzdatenquelle höher ist als der SAQ-Wert der Analysedatenquelle. Hier sind die Fahrtzeiten der Referenzdatenquelle höher:

$$g^- = \frac{\sum_{r \in R} \sqrt{(MAX(SAQ_{r \in Q_R} - SAQ_{r \in Q_A}, 0))^2}}{|R|}$$

Tabelle 6-4 zeigt die Abstandsmaße ohne und mit Korrektur der Fahrtzeiten, Tabelle 2-1 die Korrekturparameter. Die Auswertungen zeigen, dass die Fahrtzeitkorrektur nur dann eine Verbesserung bringen kann, wenn  $g^+$  und  $g^-$  unterschiedlich groß sind, d. h. wenn die Fahrtzeiten der Referenzdatenquelle für die meisten Relationen größer ( $g^+$ ) oder kleiner ( $g^-$ ) sind als die Fahrtzeiten der Analysedatenquelle. Die Anpassungsformel kann zwar systematische relative und absolute Abweichungen korrigieren, relationsspezifische Unterschiede werden nicht erkannt.

Tabelle 6-6 zeigt den Quotient  $g^+/g$ . Er gibt den Anteil der Relationen an, bei denen die Fahrtzeiten der Referenzdatenquelle größer ist. Gut korrigiert werden können Fahrtzeitausprägungen, bei denen der Quotient nahe bei 1,0 oder 0,0 liegt. Nach der Fahrtzeitanpassung liegt der Quotient  $g^+/g$  immer nahe 0,5. Bei Kombination 1 (TomTom P50 07:00, Google-Best-Guess Mo-Fr 07:00) liegt der Quotient bei 1,0. Hier ist eine Anpassung gut möglich, da alle Relationen der Analysedatenquelle eine systematische Abweichung aufweisen. Bei Kombination 4 (TomTom P75 07:00, Validate belastet) ist eine Anpassung wenig erfolgreich, da der Quotient bereits vor der Korrektur nahe 0,5 liegt.

Wäre eine Analysedatenquelle immer um exakt 1 Qualitätsstufe schlechter als eine Referenzdatenquelle, so wäre der Quotient aus  $g^+$  und  $g$  vor der Fahrtzeitkorrektur 100 %, nach der Fahrtzeitanpassung läge ein  $g$ -Wert von 1,0 vor und der Quotient aus  $g^+$  und  $g$  läge bei 0,5.

$g$	$t_{Validate}^{t0}$		$t_{Validate}^{t_{akt}}$		$t_{Google,07:00}^{BestGuess,Mo-Fr}$		$t_{Google,07:00}^{Opt,Di}$		$t_{Google,07:00}^{Pessimistic,Di}$	
$g^+$										
$g^-$										
$t_{TomTom,07:00}^{P50}$	-	-	-	-	5,18	1,49	-	-	-	-
					5,17	0,81				
					0,01	0,68				
$t_{TomTom,07:00}^{Mean}$	-	-	-	-	1,82	1,73	-	-	-	-
					1,12	0,81				
					0,7	0,92				
$t_{TomTom,07:00}^{P75}$	-	-	4,54	4,39	-	-	-	-	4,86	2,78
			2,32	2,40					4,68	1,34
			2,22	2,00					0,18	1,44
$t_{TomTom,07:00}^{P90}$	-	-	7,13	4,16	-	-	-	-	4,48	2,36
			0,17	2,21					0,15	1,16
			6,96	1,94					4,34	1,20
$t_{TomTom,20:00}^{P50}$	2,65	2,27	-	-	-	-	3,85	1,55	-	-
	0,75	1,27					3,81	0,84		
	1,89	1,01					0,04	0,71		

Tab. 6-4: Abstandsmaß  $g$  ohne Fahrtzeitkorrektur (links) und mit Fahrtzeitkorrektur (rechts) für die untersuchten Kombinationen von Fahrtzeitausprägungen

$f1$	$t_{Validate}^{t0}$	$t_{Validate}^{t_{akt}}$	$t_{Google,07:00}^{BestGuess,Mo-Fr}$		$t_{Google,07:00}^{Opt,Di}$	$t_{Google,07:00}^{Pessimistic,Di}$
$f2$						
$f3$						
$t_{TomTom,07:00}^{P50}$	-	-	0,91	0,10	-	-
			-0,02			
$t_{TomTom,07:00}^{Mean}$	-	-	1,02	0,00	-	-
			-0,04			
$t_{TomTom,07:00}^{P75}$	-	0,50	-	-	-	0,82
		15,40				6,00
		0,35				-0,02
$t_{TomTom,07:00}^{P90}$	-	0,71	-	-	-	1,14
		16,00				3,70
		0,38				-0,12
$t_{TomTom,20:00}^{P50}$	0,82	-			0,82	-
	4,30				0,80	
	0,13				0,1	
Anpassungsfunktion: $t_{r \in Q_A}^* = f_1 \cdot t_{r \in Q_A} + f_2 + f_3 \cdot t_r^{Luft}$						

Tab. 6-5:  $f$ -Parameter der Fahrzeitanpassung zwischen verschiedenen Referenz- und Analysedatenquellen für die untersuchten Kombinationen

$g+/g$	$t_{Validate}^{t0}$		$t_{Validate}^{t_{akt}}$		$t_{Google,07:00}^{BestGuess,Mo-Fr}$		$t_{Google,07:00}^{Opt,Di}$		$t_{Google,07:00}^{Pessimistic,Di}$	
$t_{TomTom,07:00}^{P50}$	-	-	-	-	1,00	0,54	-	-	-	-
$t_{TomTom,07:00}^{Mean}$	-	-	-	-	0,63	0,47	-	-	-	-
$t_{TomTom,07:00}^{P75}$	-	-	0,51	0,55	-	-	-	-	0,96	0,48
$t_{TomTom,07:00}^{P90}$	-	-	0,02	0,53	-	-	-	-	0,03	0,49
$t_{TomTom,20:00}^{P50}$	0,28	0,56	-	-	-	-	0,99	0,54	-	-

Tab. 6-6: Quotient aus g+ und g ohne Fahrzeitkorrektur (links) und mit Fahrzeitkorrektur (rechts) für die untersuchten Kombinationen

## 7 Ermittlung von Referenzkurven zur Bewertung der Angebotsqualität

Die RIN (2008) enthalten für die Bewertung der Luftliniengeschwindigkeit drei Bewertungskurven (Bild 15 bis 17 der RIN), die für die sektorale Bewertung im Pkw-Verkehr oder im ÖV oder für eine integrierte Bewertung geeignet sind. Diese Bewertungsfunktionen bieten laut RIN Orientierungswerte sowohl für die Nebenverkehrszeit als auch für die Hauptverkehrszeit. Geschätzt wurden die Kurven mit Luftliniengeschwindigkeiten, die der Hauptverkehrszeit entsprechen. Die der Schätzung zugrundeliegenden Reisezeiten wurden mit Verkehrsnachfragemodellen ermittelt.

Grundlage für eine neue Schätzung der Referenzkurven ist die in Kapitel 5 erstellte Datenbasis. Damit sollen Referenzkurven für die sektorale Bewertung im Pkw-Verkehr und im Lkw-Verkehr geschätzt werden.

Ausgehend von Diskussionen im FGSV-Arbeitsausschuss 1.3 Netzgestaltung kann es in einer Fortschreibung der RIN sinnvoll sein, zukünftig für den Pkw und ggf. auch für den Lkw Kurven zur Bewertung der Luftliniengeschwindigkeit für drei Verkehrszustände anzubieten:

- Luftliniengeschwindigkeit in der Neben- oder Schwachverkehrszeit:

Diese Bewertung basiert auf Reisezeiten ohne größere Zeitverluste durch Kapazitätsengpässe. „Die Verwendung der Fahrtzeiten in den Nebenverkehrszeiten ist dann angezeigt, wenn geprüft wird, ob zum Erreichen eines zentralen Ortes grundsätzlich eine geeignete Verbindung im Netz verfügbar ist“ (RIN, Seite 20). Hierfür könnten Reisezeiten genutzt werden, die auf folgenden Fahrtzeiten basieren:

$$t_{TomTom,20:00}^{P50} \text{ oder } t_{Google,\geq 20:00}^{BestGuess}$$

- Luftliniengeschwindigkeit in der Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen:

Diese Bewertung basiert auf den Reisezeiten in der Hauptverkehrszeit, in der in Teilen des Netzes Zeitverluste durch Kapazitätsengpässe auftreten. Um eine Unterscheidung in morgendliche und abendliche Hauptverkehrszeit zu vermeiden, wird für die Schätzung der Kurven das Maximum aus beiden Zeiträumen herangezogen.

„Die Verwendung der Fahrtzeiten in den Hauptverkehrszeiten ist dann angezeigt, wenn geprüft wird, ob eine solche Verbindung für die Verkehrsnachfrage ausreichend bemessen ist“ (RIN, Seite 20). Hierfür könnten Reisezeiten genutzt werden, die auf folgenden Fahrtzeiten basieren:

$$MAX \left( t_{TomTom,07:00}^{P50}, t_{TomTom,17:00}^{P50} \right) \text{ oder}$$

$$MAX \left( t_{Google,07:00}^{BestGuess}, t_{Google,17:00}^{BestGuess} \right)$$

- Luftliniengeschwindigkeit in der Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen:

Diese Bewertung basiert auf den Reisezeiten in der Hauptverkehrszeit, bei der zufällige Störungen auftreten. Damit sind Aussagen zur Zuverlässigkeit möglich. Hierfür könnten Reisezeiten genutzt werden, die auf folgenden Fahrtzeiten basieren:

$$MAX \left( t_{TomTom,07:00}^{P75}, t_{TomTom,17:00}^{P75} \right) \text{ oder}$$

$$MAX \left( t_{Google,07:00}^{Pessimistic}, t_{Google,17:00}^{Pessimistic} \right)$$

Die Referenzkurven der Luftliniengeschwindigkeit werden mit zwei unterschiedlichen Ansätzen bestimmt:

- Ermittlung der Referenzkurven aus den empirischen Reisezeiten der Datenbasis (Kapitel 7.1):

Dieser Ansatz folgt der Vorgehensweise der RIN (2008). Die Parameter der Referenzkurven werden so geschätzt, dass sie die beobachteten empirischen Reisezeiten zwischen den Orten wiedergeben.

- Ermittlung der Referenzkurven aus typischen Eigenschaften des Verkehrsnetzes (Kapitel 7.2):

Dieser Ansatz leitet aus den empirischen Werten induktiv theoretische Reisezeiten ab, die von der Luftlinienentfernung abhängen. Dazu werden typische Umwegigkeiten und Netzgeschwindigkeiten verwendet.

## 7.1 Ermittlung geschätzter Referenzkurven anhand empirischer Werte

### 7.1.1 Vorgehensweise zur Schätzung der Parameter für die Referenzkurven

Die Schätzung der Referenzkurven geht davon aus, dass der den RIN-Bewertungskurven zugrundeliegende Funktionstyp unverändert bleibt (siehe Bild 7-1), die mittlere Referenzkurve weiterhin der Grenze SAQ B/C entspricht und die übrigen Kurven gleichmäßig abgestuft werden. Ziel der Parameterschätzung ist es, die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  der in Bild 7-1 dargestellten Funktion für die fünf SAQ-Kurven A/B bis E/F zu bestimmen.

Die Schätzung der Parameter erfolgt mit den nachfolgend beschriebenen Methoden. Bei allen Methoden werden die Parameter automatisch entsprechend einer Zielfunktion (z. B. Minimierung der Abstandsquadrate) geschätzt. Die Parameterschätzung erfolgt in drei Schritten:

#### Schritt 1: Schätzung einer mittleren Referenzkurve (SAQ B/C)

Bei der B/C-Kurven-Schätzung werden zwei Vorgehensweisen untersucht. Bei beiden Vorgehensweisen werden die Relationen Entfernungsklassen der Luftlinienentfernung zugeordnet. Hierzu werden Entfernungsklassen in 10 km-Intervallen gebildet. Diese Intervalleinteilung wird im Entfernungsbereich von 0-500 km durchgeführt und führt zu 50 Entfernungsklassen.

- Median-Methode:

In jeder Entfernungsklasse wird der Median der Luftliniengeschwindigkeit [km/h] der Relationen entweder ungewichtet oder gewichtet ermittelt. Dazu wird jeder Relation ein Gewicht zugeordnet. Für den ungewichteten Fall erhält jede Relation das gleiche Gewicht  $g = 1$ . Eine Gewichtung kann die Nachfragebedeutung einer Relation

$$v_k^{L,ufi}(l^{L,ufi}) = \frac{l}{a_k \cdot (l^{L,ufi})^{b_k} + c_k}$$

mit

$v_k^{L,ufi}$	Luftliniengeschwindigkeit [km/h] der $k$ . SAQ-Kurve
$l^{L,ufi}$	Luftlinienentfernung [km] zwischen Start- und Zielpunkt
$a_k, b_k, c_k$	Parameter der $k$ . SAQ-Kurve

Bild 7-1: Funktion für die Berechnung der SAQ-Kurven der Luftliniengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung (Quelle: RIN (FGSV 2008, Bild 26))

abbilden, die über die Verbindungsfunktionsstufen der RIN nur vereinfacht berücksichtigt wird. Als Gewicht wird im Folgenden die Summe der Einwohner am Quell- und Zielort festgelegt. Anschließend wird die Referenzkurve so ermittelt, dass die Summe der mittleren quadratischen Abweichungen zwischen den Median-Punkten und der geschätzten Kurve minimiert wird.

- SAQ-Methode:

Die Kurve wird so ermittelt, dass in jeder Entfernungsklasse 50 % der Relationen besser als SAQ B/C und 50 % der Relationen schlechter als B/C bewertet werden. Während bei der Median-Methode zuerst die Median-Punkte ermittelt werden und dann die Kurve für die Median-Punkte bestimmt wird, wird bei der SAQ-Methode die Kurve so festgelegt, dass die relative Abweichung zwischen den besser als B bewerteten Relationen und den schlechter als B bewerteten Relationen minimiert wird.

Beide Methoden zeigen ähnliche Ergebnisse. In Kapitel 7.1.2 werden deshalb nur die Ergebnisse der Median-Methode vorgestellt.

#### Schritt 2: Schätzung der A/B-Kurve

Der  $b$ -Parameter der Schätzungsfunktion wird aus der B/C-Kurven-Schätzung festgehalten und als konstant gewählt, um eine A/B-Kurve zu erhalten, die einen zur B/C-Kurven ähnlichen Verlauf aufweist. Die Relationen werden, wie bei der B/C-Schätzung, in 10 km Entfernungsklassen eingeteilt. Innerhalb dieser Entfernungsklassen soll ein vorgegebener Anteil an Relationen eine A-Bewertung und B-Bewertung erhalten. Bei einer Vorgabe von 25 % wird die A/B-Kurve so optimiert, dass 25 % der Relationen eine A-Bewertung und 25 % eine B-Bewertung erhalten. Diese Vorgabe führt zu einer relativ geringen Spreizung der Kurven. Um die Spreizung zu erhöhen, können die Anteile der A-Bewertung auf 16,5 % und 12,5 % reduziert werden. Tabelle 7-1 zeigt die Vorgaben der Anteile für die Schätzung der A/B-Kurve, für die die Kurven geschätzt wurden.

SAQ A	SAQ B	SAQ A+B	SAQ C+D+E+F
25,0 %	25,0 %	50 %	50 %
16,5 %	33,5 %	50 %	50 %
12,5 %	37,5 %	50 %	50 %

Tab. 7-1: Mögliche Vorgaben der Anteile für die Schätzung der A/B-Kurve

Die A/B-Kurve wird dabei so geschätzt, dass die Summe der mittleren quadratischen Abweichungen zwischen den relativen Verteilungen innerhalb der Entfernungsklassen und der vorgegebenen Verteilung minimiert wird.

### Schritt 3: Schätzung der C/D/E-Kurven

Der  $b$ -Parameter der Schätzungsfunktion wird aus der B/C-Kurven-Schätzung festgehalten und als konstant gewählt, um Referenzkurven zu erhalten, die einen zur B/C-Kurven ähnlichen Verlauf aufweisen. Für die Schätzungen der C/D- D/E und E/F-Kurven werden die Abstände der Funktionen A/B und B/C übertragen. Somit ergeben sich gleichabständige Referenzkurven.

#### 7.1.2 Ergebnisse der Schätzung

Die Bilder 7-4 bis Bild 7-18 zeigen die Ergebnisse der Schätzung für 15 Fälle für den Pkw: Die Parameterwerte der Schätzungen sind in Anlage 5 ausgewiesen. Die Schätzungen für den Lkw befinden sich in Anlage 6.

- 5 Ausprägungen der Fahrt- bzw. Reisezeit:
  - TomTom Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen
  - TomTom Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen
  - TomTom Schwachverkehrszeit
  - Verkehrsnachfragemodell Validate unbelastet
  - Verkehrsnachfragemodell Validate belastet
- 3 Ausprägungen der Anteile für die Schätzung der A/B-Kurve aus Tabelle 7-1.

Grundlage der Schätzungen sind die B/C-Kurven. In Bild 7-2 und Bild 7-3 sind B/C-Kurven für verschiedene Ausprägungen dargestellt. Bild 7-4 bis Bild 7-18 zeigen die Grafiken für verschiedene

Spreizungen. Jedes Bild enthält folgende Informationen:

- RIN-Kurven als graue gestrichelte Linien. Die B/C-Kurve ist dicker dargestellt.
- Die geschätzten Kurven als schwarze Linie. Die B/C-Kurve ist dicker dargestellt.

Auf der rechten Seite ist ein Histogramm dargestellt, das die Anteile jeder SAQ-Stufe für die RIN-Kurven und die neu geschätzten Kurven zeigt. Bewertet werden die rund 21.500 Relationen der Datenbasis, die Grundlage der Parameterschätzung sind. Die Vorgaben für die Anteile der A-Bewertungen und der A+B Bewertungen aus Tabelle 7-1 werden dabei auf der Ebene aller Relationen nicht eingehalten, da die Parameter der Kurven anhand des Medians jeder Entfernungsklasse geschätzt werden und die Entfernungsklassen nicht gleichmäßig besetzt sind.

## SAQ-Referenzkurven B/C

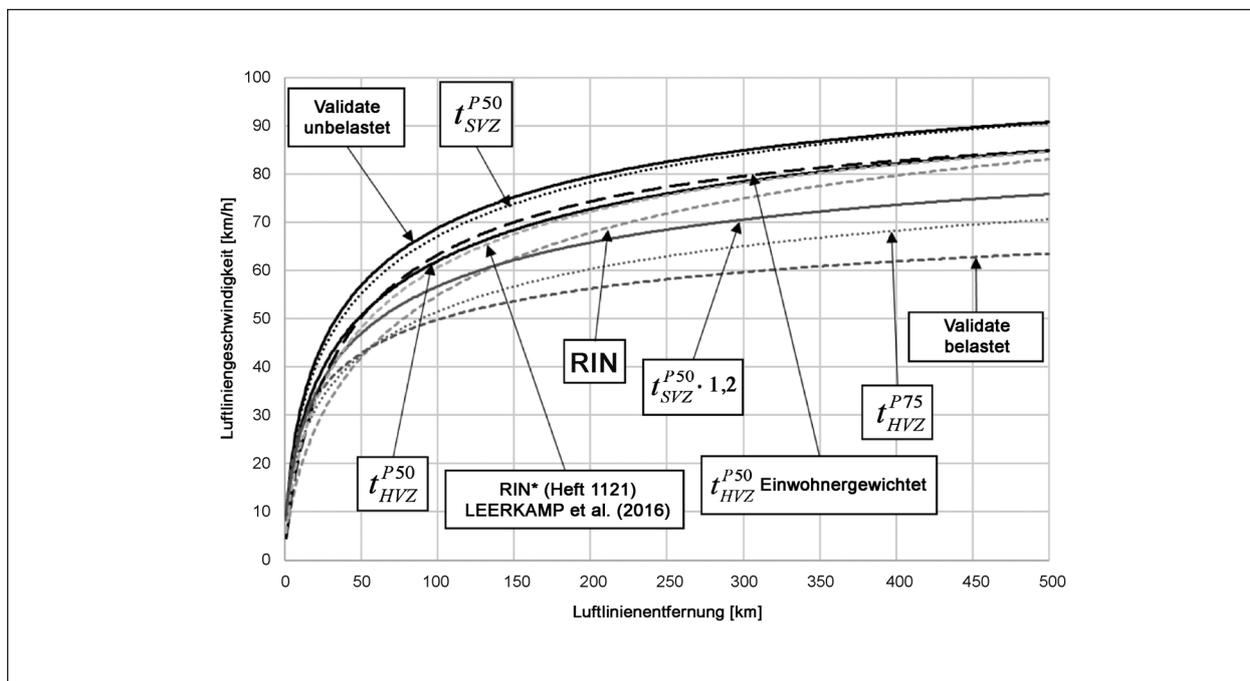


Bild 7-2: SAQ-Referenzkurven B/C im Entfernungsbereich 0-500 km

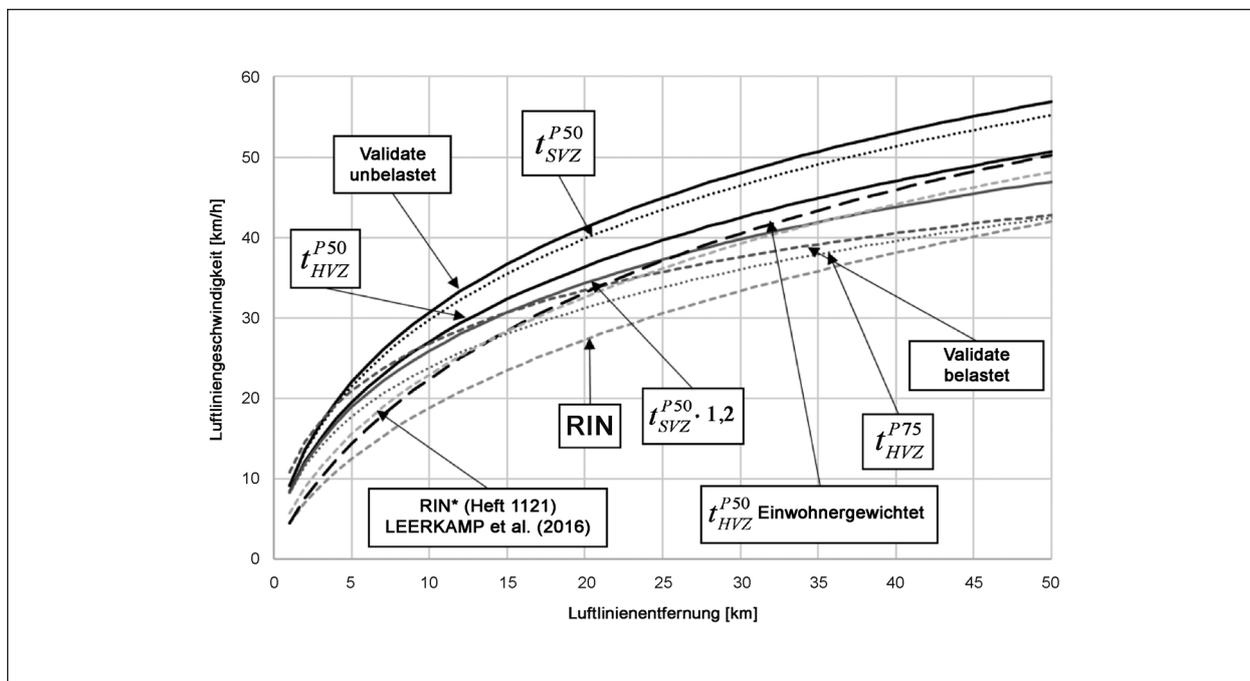


Bild 7-3: SAQ-Referenzkurven B/C im Entfernungsbereich 0-50 km

TomTom Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen

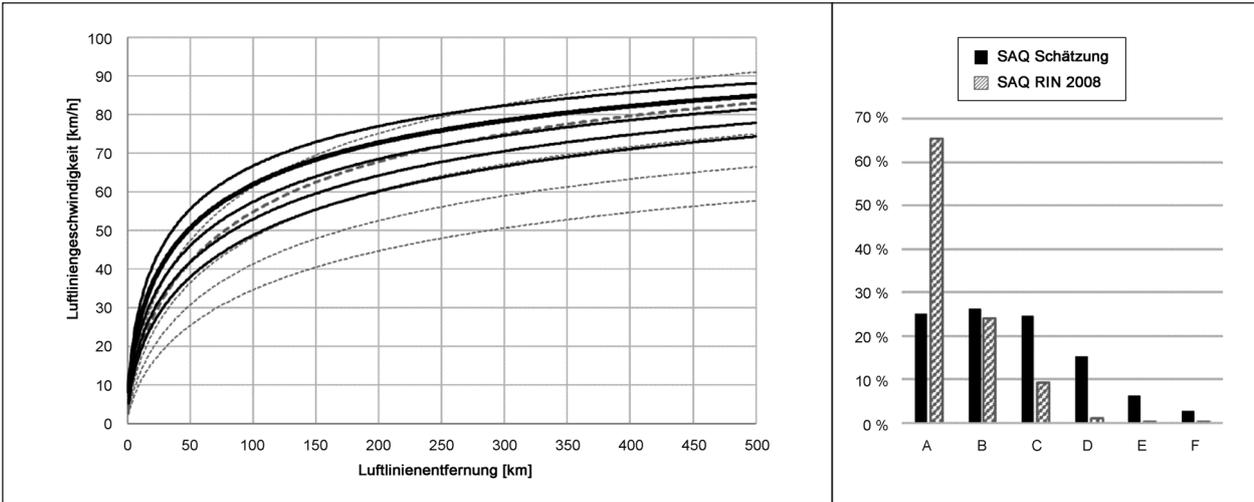


Bild 7-4: SAQ-Referenzkurven HVZ ohne Störung  $MAX(t_{TomTom,07:00}^{P50}, t_{TomTom,17:00}^{P50})$  (A = 25 %)

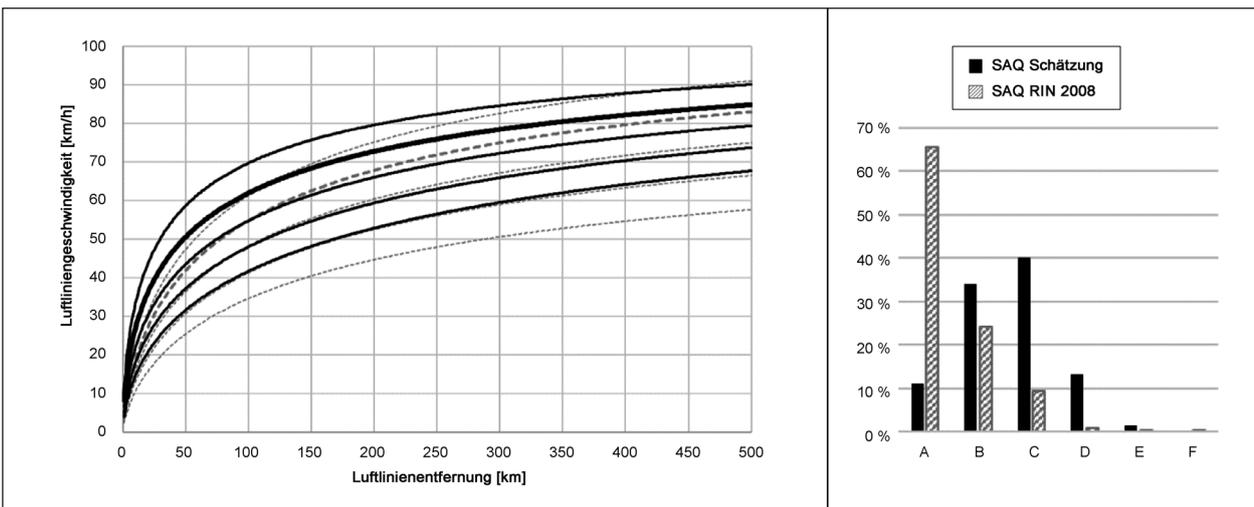


Bild 7-5: SAQ-Referenzkurven HVZ ohne Störung  $MAX(t_{TomTom,07:00}^{P50}, t_{TomTom,17:00}^{P50})$  (A = 16,5 %)

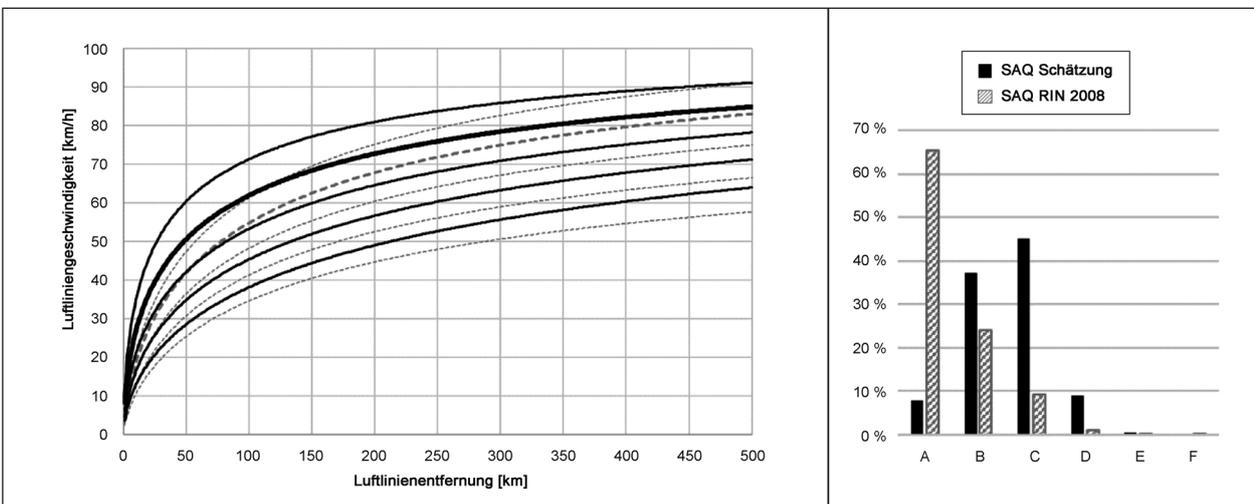


Bild 7-6: SAQ-Referenzkurven HVZ ohne Störung  $MAX(t_{TomTom,07:00}^{P50}, t_{TomTom,17:00}^{P50})$  (A = 12,5 %)

### TomTom Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen

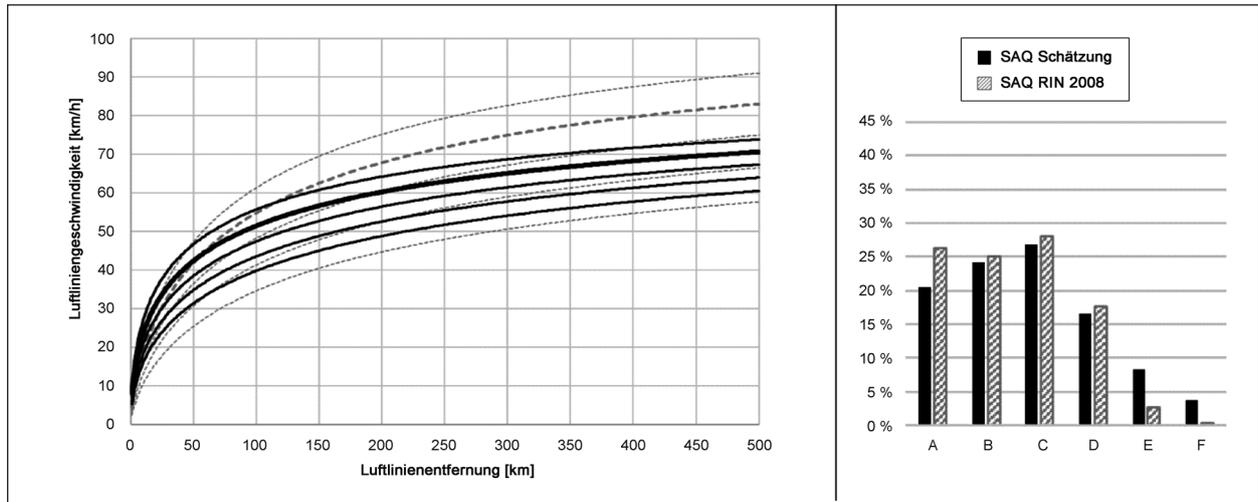


Bild 7-7: SAQ-Referenzkurven HVZ mit Störung  $MAX(t_{TomTom,07:00}^{P75}, t_{TomTom,17:00}^{P75})$  (A = 25 %)

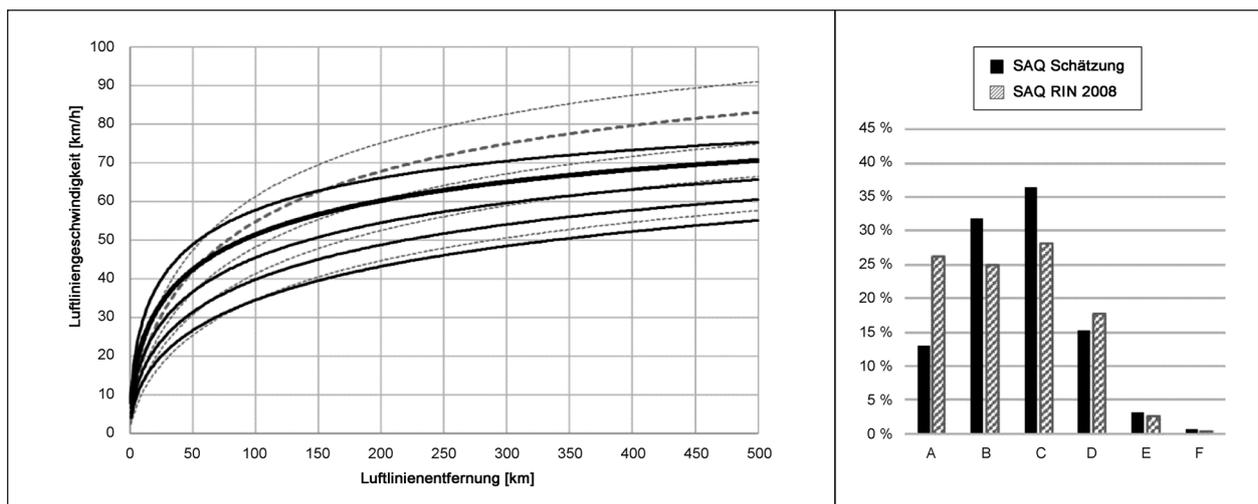


Bild 7-8: SAQ-Referenzkurven HVZ mit Störung  $MAX(t_{TomTom,07:00}^{P75}, t_{TomTom,17:00}^{P75})$  (A = 16,5 %)

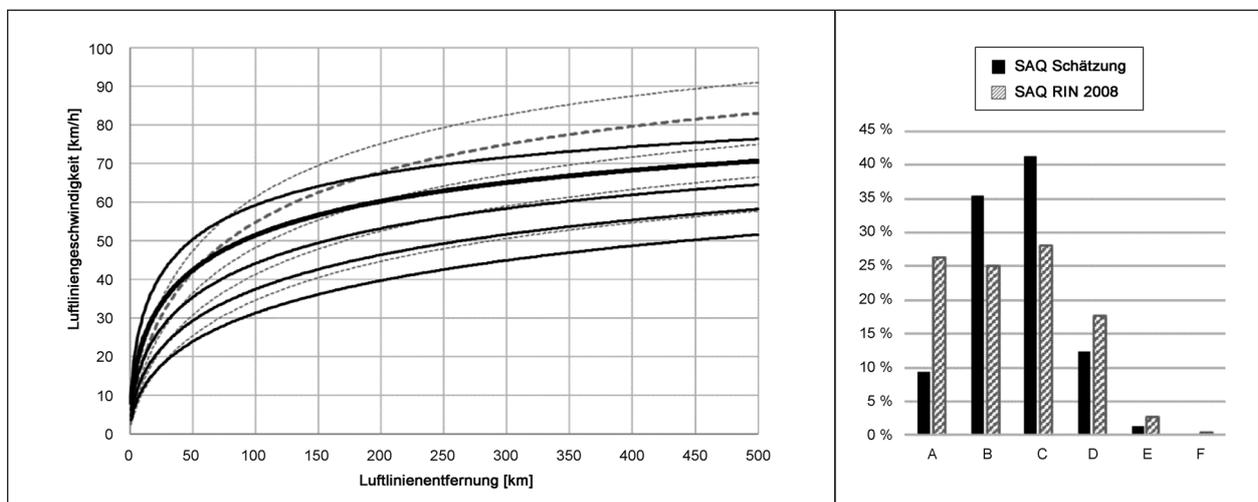


Bild 7-9: SAQ-Referenzkurven HVZ mit Störung  $MAX(t_{TomTom,07:00}^{P75}, t_{TomTom,17:00}^{P75})$  (A = 12,5 %)

TomTom Schwachverkehrszeit

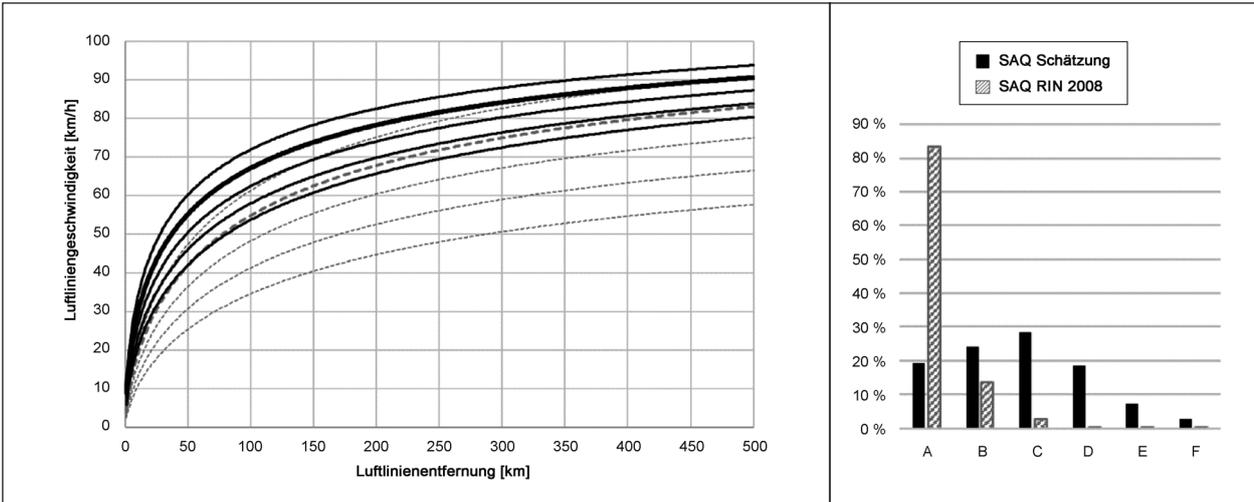


Bild 7-10: SAQ-Referenzkurven SVZ  $t_{TomTom,20:00}^{P50}$  (A=25 %)

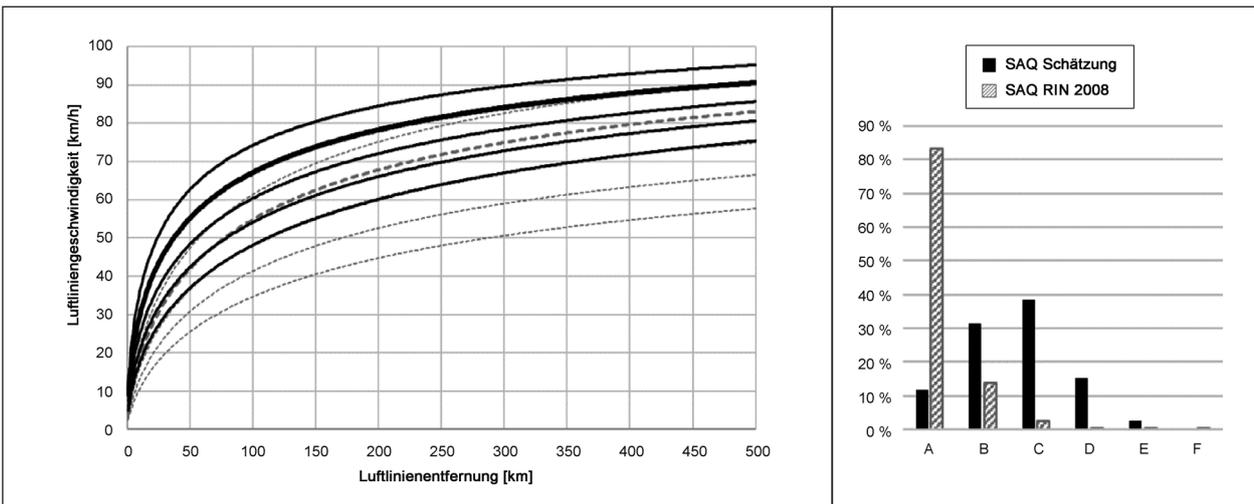


Bild 7-11: SAQ-Referenzkurven SVZ  $t_{TomTom,20:00}^{P50}$  (A=16,5 %)

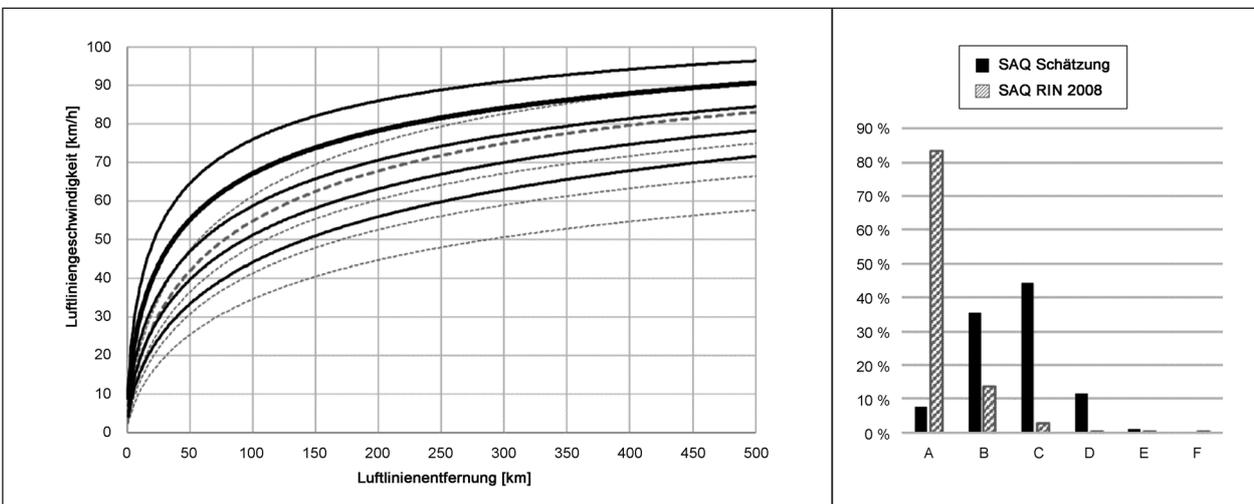


Bild 7-12: SAQ-Referenzkurven SVZ  $t_{TomTom,20:00}^{P50}$  (A=12,5 %)

Verkehrsnachfragemodell Validare unbelastet

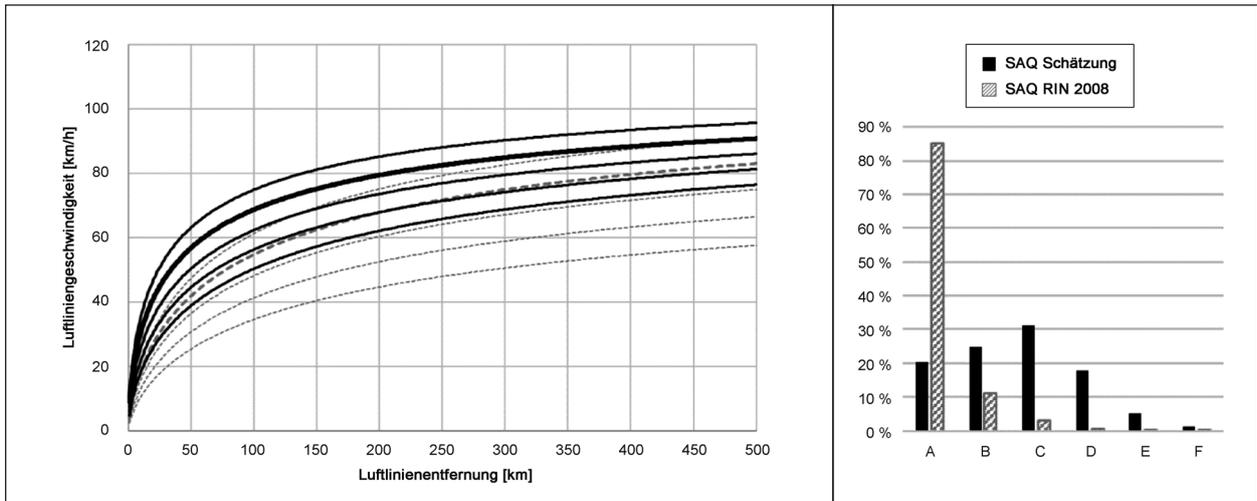


Bild 7-13: SAQ-Referenzkurven Validare unbelastet (A = 25 %)

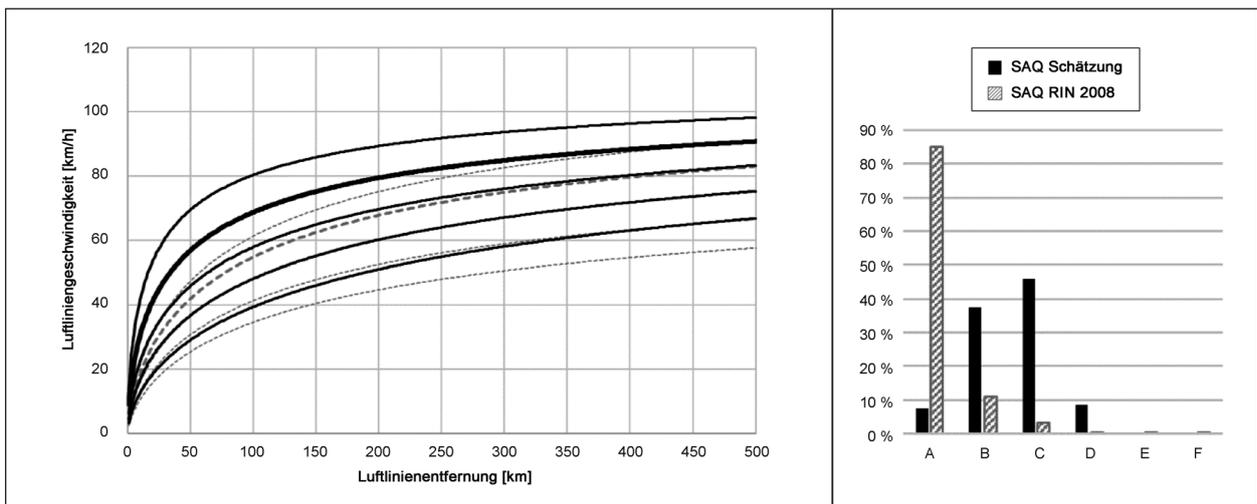


Bild 7-14: SAQ-Referenzkurven Validare unbelastet (A = 16,5 %)

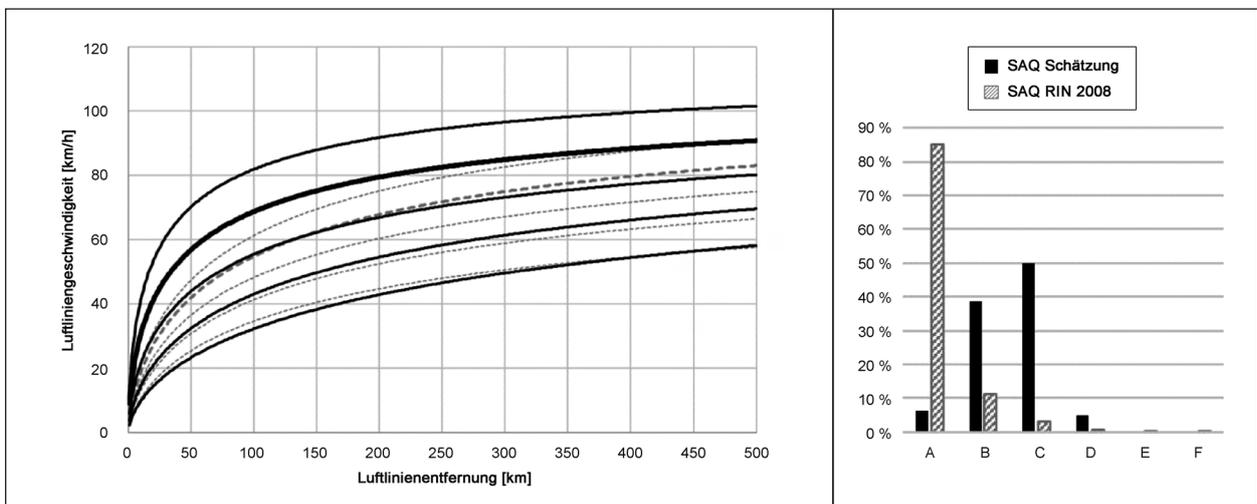


Bild 7-15: SAQ-Referenzkurven Validare unbelastet (A = 12,5 %)

Verkehrsnachfragemodell Validate belastet

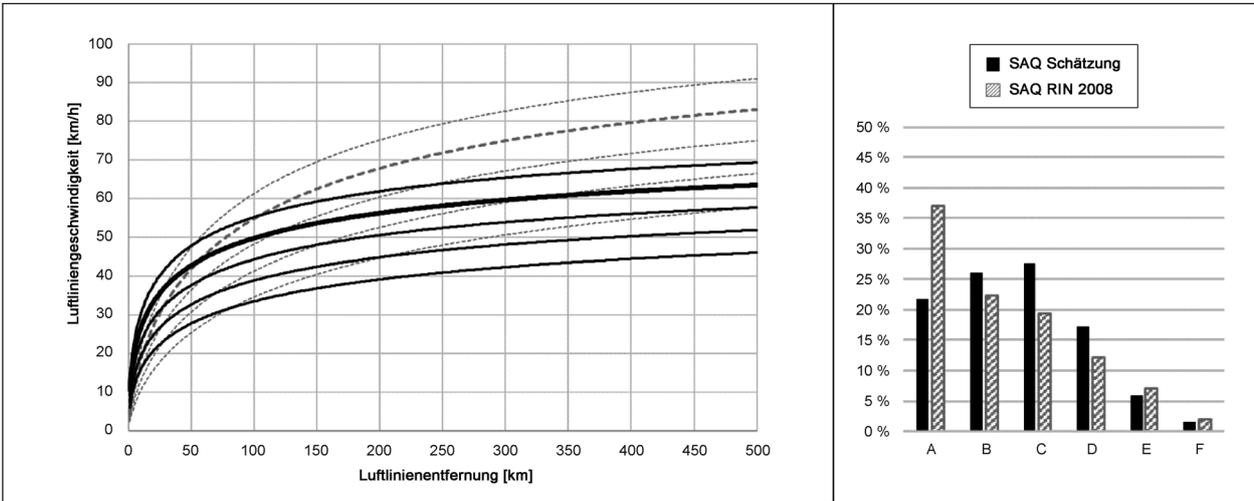


Bild 7-16: SAQ-Referenzkurven Validate belastet (A = 25 %)

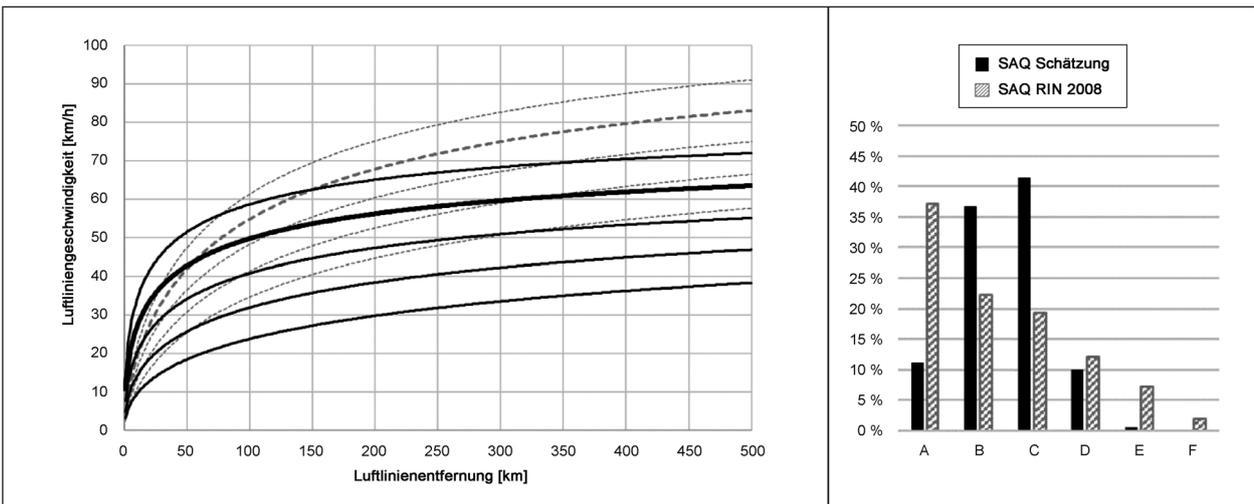


Bild 7-17: SAQ-Referenzkurven Validate belastet (A = 16,5 %)

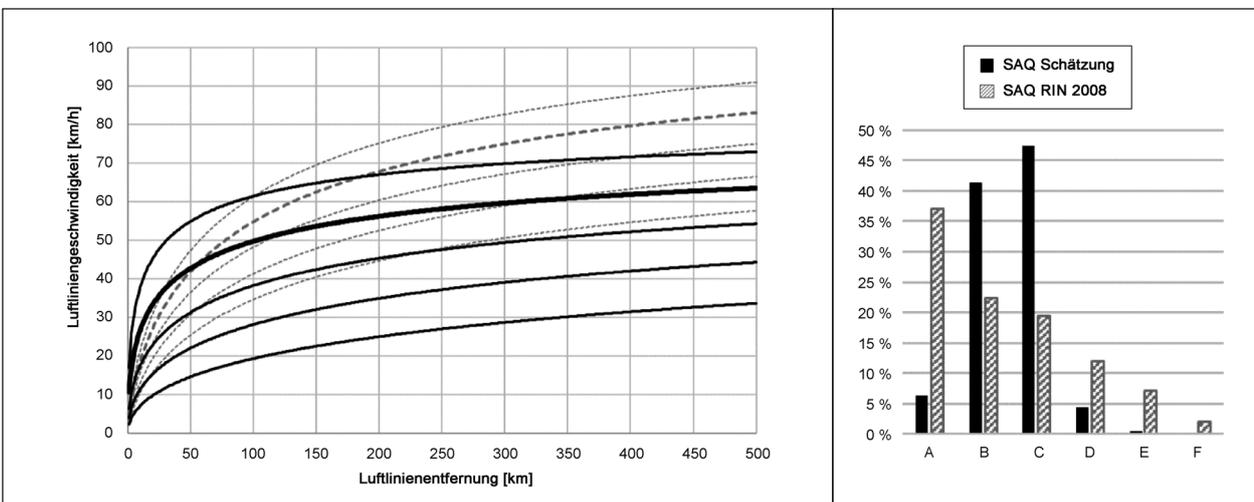


Bild 7-18: SAQ-Referenzkurven Validate belastet (A = 12,5 %)

## 7.2 Ermittlung theoretischer Referenzkurven anhand typischer Netzeigenschaften

Die Ergebnisse der in Kapitel 7.1 geschätzten Referenzkurven ergeben sich aus den empirischen Reisezeiten der Datenbasis. Dabei gibt es keinen direkten Bezug zu den angestrebten mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten nach RIN (2008, Tabelle 13). Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem die Referenzkurven aus den Eigenschaften des Netzes und den Eigenschaften einer Verbindung abgeleitet werden. Dabei werden folgende Eigenschaften berücksichtigt:

- **Umwegigkeit einer Verbindung:**  
Der Umwegfaktor einer Verbindung sinkt mit der Luftlinienentfernung. Dieser Zusammenhang wird bereits in den RIN (siehe Bild 2-4) für die Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität genutzt. Mit den Umwegfaktoren der rund 21.500 Relationen aus der Datenbasis wird dieser Zusammenhang neu bestimmt. Damit ergibt sich ein Zusammenhang von Luftlinienentfernung und Reiseweite.
- **Straßenkategorien einer Verbindung:**  
Jede Verbindung nutzt zwischen dem Startort und Zielort Straßen unterschiedlicher Kategorien. Mit zunehmender Reiseweite erhöht sich der Längenanteil von Straßenkategorien mit einer hohen Verbindungsfunktionsstufe. Nutzt man das Streckenattribut Functional-Road-Class (FRC) als Approximation für die Straßenkategorie, dann lässt sich aus den rund 21.500 Relationen der Datenbasis ein Zusammenhang zwischen der Luftlinienentfernung und dem Anteil der Reiseweite für jede FRC ermitteln.

- **Fahrtgeschwindigkeit einer Straßenkategorie:**  
Jede Straßenkategorie zeichnet sich durch eine typische Fahrtgeschwindigkeit aus. Mit Bezug auf die in den RIN vorgeschlagenen Fahrtgeschwindigkeiten (siehe Tabelle 2-5) wird jeder FRC eine angestrebte Fahrtgeschwindigkeit zugeordnet.

Auf diese Weise ergibt sich aus der Luftlinienentfernung einer Relation eine Fahrtzeit, die die typischen Umwegfaktoren, die Längenanteile der FRC und die typischen Fahrtgeschwindigkeiten einer FRC berücksichtigt. Über die bekannte Luftlinienentfernung, den Umwegfaktor und den Anteil der Fahrtweite werden verschiedene Referenzkurven erstellt.

### 7.2.1 Vorgehensweise zur Schätzung der Parameter für die Referenzkurven

#### Ermittlung des Umwegfaktors

In der Datenbasis liegen für alle 21.582 Relationen die Luftlinienentfernung und die Fahrweite vor. Diese Relationen werden in Klassen mit einer Klassenbreite von 10 km Luftlinienentfernung eingeteilt. In jeder Klasse werden aus allen sich in dieser Klasse befindlichen Relationen die Perzentile des Umwegfaktors in 0,5 % Schritten gebildet. Die Schätzung der Kurven der Umwegigkeit geht davon aus, dass der zugrundeliegende Funktionstyp der RIN (2008) (siehe Bild 7-19) unverändert bleibt. Ziel der Parameterschätzung ist es, die Parameter  $a$  und  $b$  der in Bild 7-19 dargestellten Funktion für die Perzentile der Umwegigkeit zu bestimmen. Die Schätzung der Parameter erfolgt mit der Zielfunktion Minimierung der Abstandsquadrate.

$$f_k^{Umweg}(l^{Luft}) = \frac{10^{(a_k + b_k \cdot \log_{10}(l^{Luft}))}}{l^{Luft}}$$

mit:

$f_k^{Umweg}(l^{Luft})$	Funktion des Umwegfaktors für die k. SAQ-Kurve
$l^{Luft}$	Luftlinienentfernung [km] zwischen Start- und Zielpunkt
$a_k, b_k$	Parameter der k. SAQ-Kurve

Bild 7-19: Funktion für die Berechnung der SAQ-Kurven der Umwegfaktoren in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung (Quelle: RIN (FGSV 2008, Bild 32))

Dazu werden wie bei den Referenzkurven der Luftliniengeschwindigkeit zuerst die Parameter der B/C-Kurve so ermittelt, dass in jeder Entfernungsklasse 50% der Relationen besser als SAQ B/C und 50 % der Relationen schlechter als SAQ B/C bewertet werden. Anschließend wird die A/B-Kurve so festgelegt, dass über alle Entfernungsklassen rund 1/6 aller Relationen im Bereich A liegen. Die Abstände zwischen der B/C-Kurve und der A/B-Kurve werden dann auf die verbleibenden Kurven übertragen. In Bild 7-20 sind die vorgeschlagenen Bewertungskurven der Umwegigkeit dargestellt. Die Parameter der SAQ-Kurven sind in Tabelle 7-2 angegeben. Die Bewertungskurve A/B hat einen b-Parameter von

1,0 und ist somit eine gerade bei einem Umwegfaktor von circa 1,16.

Eine Verteilung der 21.582 Relationen differenziert nach Entfernungsklassen und Bewertungsstufen ist in Tabelle 7-3 dargestellt.

Die fünf SAQ-Kurven des Umwegfaktors werden im Folgenden genutzt um die fünf SAQ-Kurven der Luftliniengeschwindigkeit zu bestimmen. Für die SAQ-Kurve A/B der Luftliniengeschwindigkeit wird die Fahrtweite mit den Umwegfaktoren der SAQ-Kurve A/B ermittelt. Für die anderen SAQ-Kurven wird analog vorgegangen. Die Spreizung der theoretischen Referenzkurven der Luftliniengeschwindigkeit ergibt sich damit aus der Spreizung der SAQ-Kurven des Umwegfaktors.

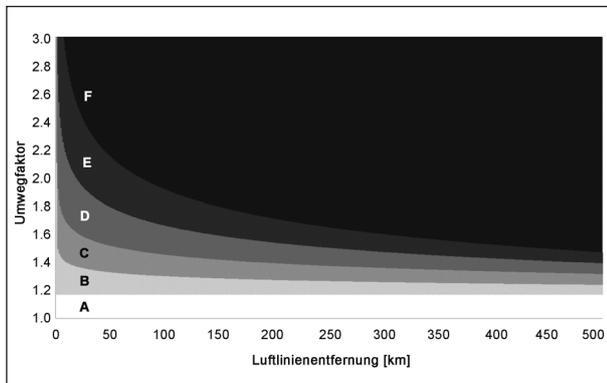


Bild 7-20: Bewertungskurven zur Bewertung der Umwegfaktoren

### Ermittlung der Anteile der FRC an der Fahrtweite

Ziel dieses Schrittes ist eine funktionale Beschreibung der Anteile einer Straßenfunktionsklasse (FRC) in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung. Grundlage sind die beobachteten Anteile der FRC an der Fahrtweite für die rund 21.500 Relationen der TomTom-Daten. Hierzu werden die Relationen wie bei der Ermittlung der Umwegfaktoren in 10 km Luftlinienklassen eingeteilt. Für jede Klasse wird der Mittelwert der Längenanteile der Relationen jeder FRC bestimmt. Aus diesen Werten wird ein Anteil jeder FRC an der gesamten Fahrtweite innerhalb der Entfernungsklasse ermittelt. Als Grundlage für die Schätzung der FRC-Anteil-Funktionen wird eine Gammafunktion genutzt. Die Gammafunktion ist eine Verallgemeinerung der Exponentialfunktion und ist deshalb flexibler in den Kurvenverläufen.

Parameter	A/B	B/C	C/D	D/E	E/F
a	0,065	0,172	0,282	0,436	0,611
b	1,000	0,970	0,939	0,891	0,835

Tab. 7-2: Parameter der SAQ-Kurven des Umwegfaktors für Luftlinienentfernung von 0 bis 500 km

Entfernungsklasse [Luftlinienweite in km]	A	B	C	D	E	F	A – F
0 – 50	16,7 %	38,1 %	31,5 %	11,4 %	2,0 %	0,4 %	100 %
50 – 100	10,1 %	37,1 %	32,0 %	16,2 %	4,1 %	0,5 %	100 %
100 – 200	8,8 %	33,2 %	33,9 %	19,8 %	3,5 %	0,7 %	100 %
200 – 300	5,9 %	29,8 %	36,1 %	23,1 %	4,9 %	0,2 %	100 %
400 – 500	3,3 %	26,4 %	46,0 %	22,4 %	1,9 %	0,0 %	100 %
500 – 999	1,1 %	27,1 %	46,5 %	24,2 %	1,0 %	0,2 %	100 %
0 – 999	13,6 %	36,5 %	32,8 %	14,1 %	2,6 %	0,4 %	100 %

Tab. 7-3: Verteilung der Relationen der Datenbasis auf die Bewertungsstufen differenziert nach Entfernungsklassen

Ziel der Parameterschätzung ist es, die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  der in Bild 7-21 dargestellten Funktion für eine FRC-Anteil-Funktion zu bestimmen. Die Schätzung der Parameter erfolgt mit der Zielfunktion Mini-

mierung der Abstandsquadrate. In Bild 7-22 sind die Anteile der Fahrtweiten der FRC über der Luftlinienentfernung dargestellt.

$$p_{FRC}^{Fahrt}(l^{Luft}) = \frac{a \cdot ((b^c / \text{Gamma}(c)) \cdot l^{Luft(c-1)} \cdot e^{-b \cdot l^{Luft}})}{\sum_{FRC} a \cdot ((b^c / \text{Gamma}(c)) \cdot l^{Luft(c-1)} \cdot e^{-b \cdot l^{Luft}})}$$

mit

$p_{FRC}^{Fahrt}(l^{Luft})$  Funktion zur Abschätzung des Längenanteils der Straßenfunktionsklasse FRC an der Fahrtweite einer Relation mit der Luftlinienentfernung  $l^{Luft}$

$\text{Gamma}(c) = \int_0^{\infty} t^{c-1} \cdot e^{-t} dt$

$l^{Luft}$  Luftlinienentfernung [km] zwischen Start- und Zielpunkt

$a, b, c$  Parameter

Bild 7-21: Funktion für die Berechnung der Anteile der FRC an der Fahrtweite in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung

Parameter	FRC 0	FRC 1	FRC 2	FRC 3	FRC 4	FRC 5	FRC 6	FRC 7
a	0,007536	1,466503	2,465586	3,754873	6,030028	0,085032	0,574910	1,035283
b	1,082005	1,081948	1,078661	1,083045	1,080636	1,076115	1,077158	1,076651
c	3,221030	1,636638	1,050090	1,056369	0,873686	1,070018	0,824808	0,746160

Tab. 7-4: Parameter der Anteile der FRC an der Fahrtweite

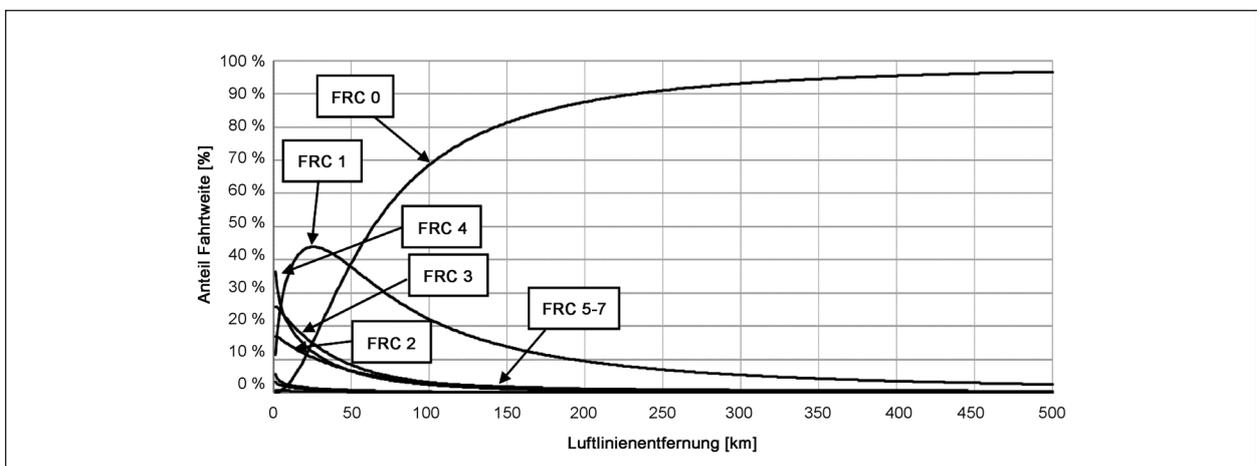


Bild 7-22: Anteile der Fahrtweite je Entfernungsklasse differenziert nach FRC

In den Bildern 7-23 bis 7-25 werden die beobachteten Werte den modellierten Ergebnissen der FRC-Anteil-Funktion sowohl für die relativen Anteile als auch für die absoluten Fahrtweiten gegenübergestellt. Die beobachteten Werte sind jeweils die Mittelwerte aller Relationen der Datenbasis in der jeweiligen Entfernungsklasse bei einer Klassenbreite von 10 km. Jeder Punkt repräsentiert den Mittelwert einer Klasse. Die modellierten Werte zeigen den Verlauf der FRC-Anteil-Funktion (Gammafunktion). Die in den Straßenfunktionsklassen 5 bis 7 zurückgelegten Entfernungen sind gering. Die Entfernun-

gen sind hier unabhängig von der Luftlinienentfernung näherungsweise konstant und liegen bei knapp einem Kilometer. Bei den Straßenfunktionsklassen 2 bis 4 sinkt die mittlere Entfernung mit zunehmender Luftlinienentfernung, da die Nutzung des hochrangigen Straßennetzes (FRC 0 und 1) mit Umwegen verbunden sein kann. Deshalb kann es bei nahräumigen Verbindungen sinnvoll sein, Straßen mit einer geringeren Funktion zu wählen.

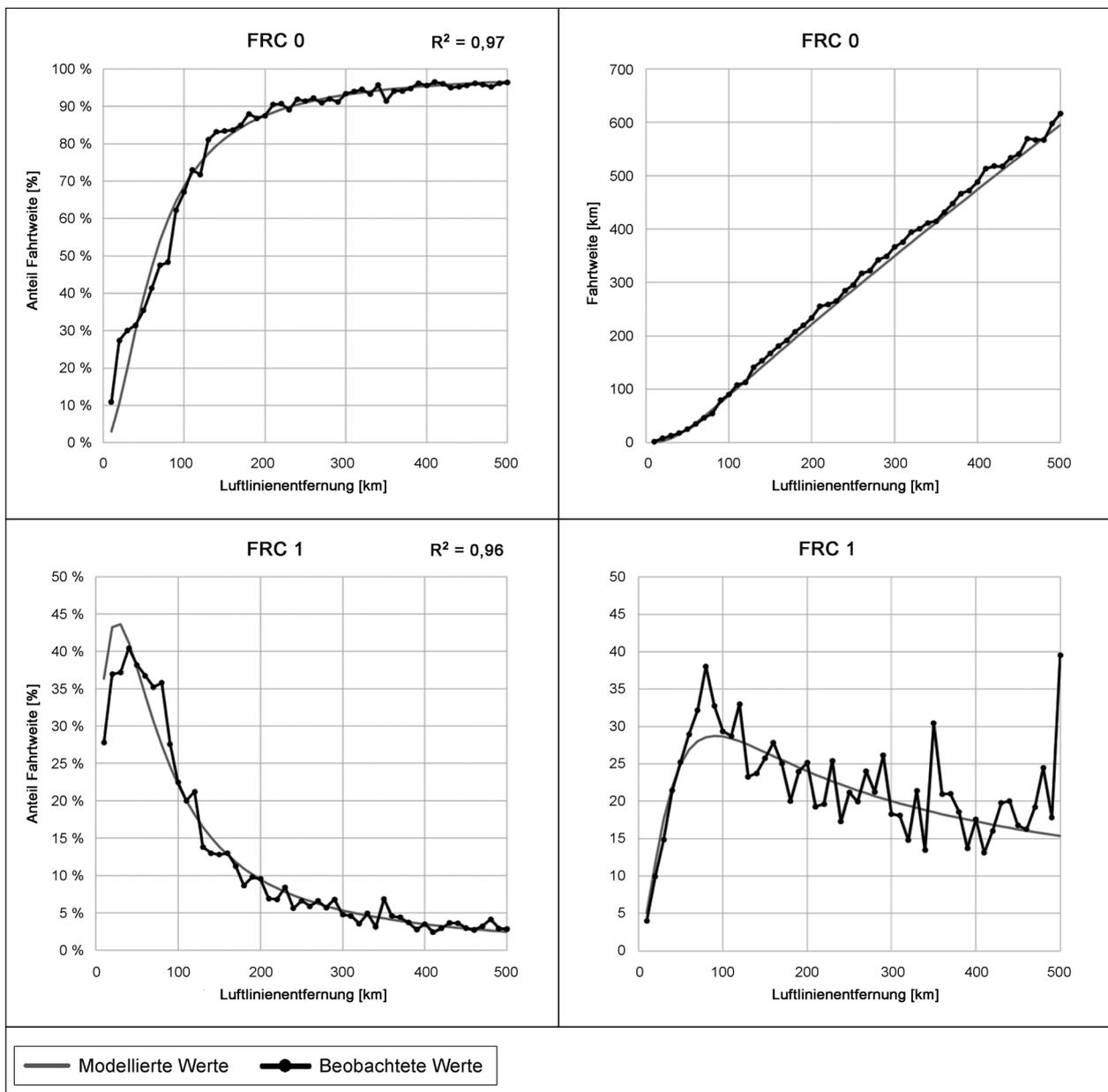


Bild 7-23: Anteil der Fahrtweite (links) und absolute Fahrtweite (rechts) je Entfernungsklasse für FRC 0 und FRC 1

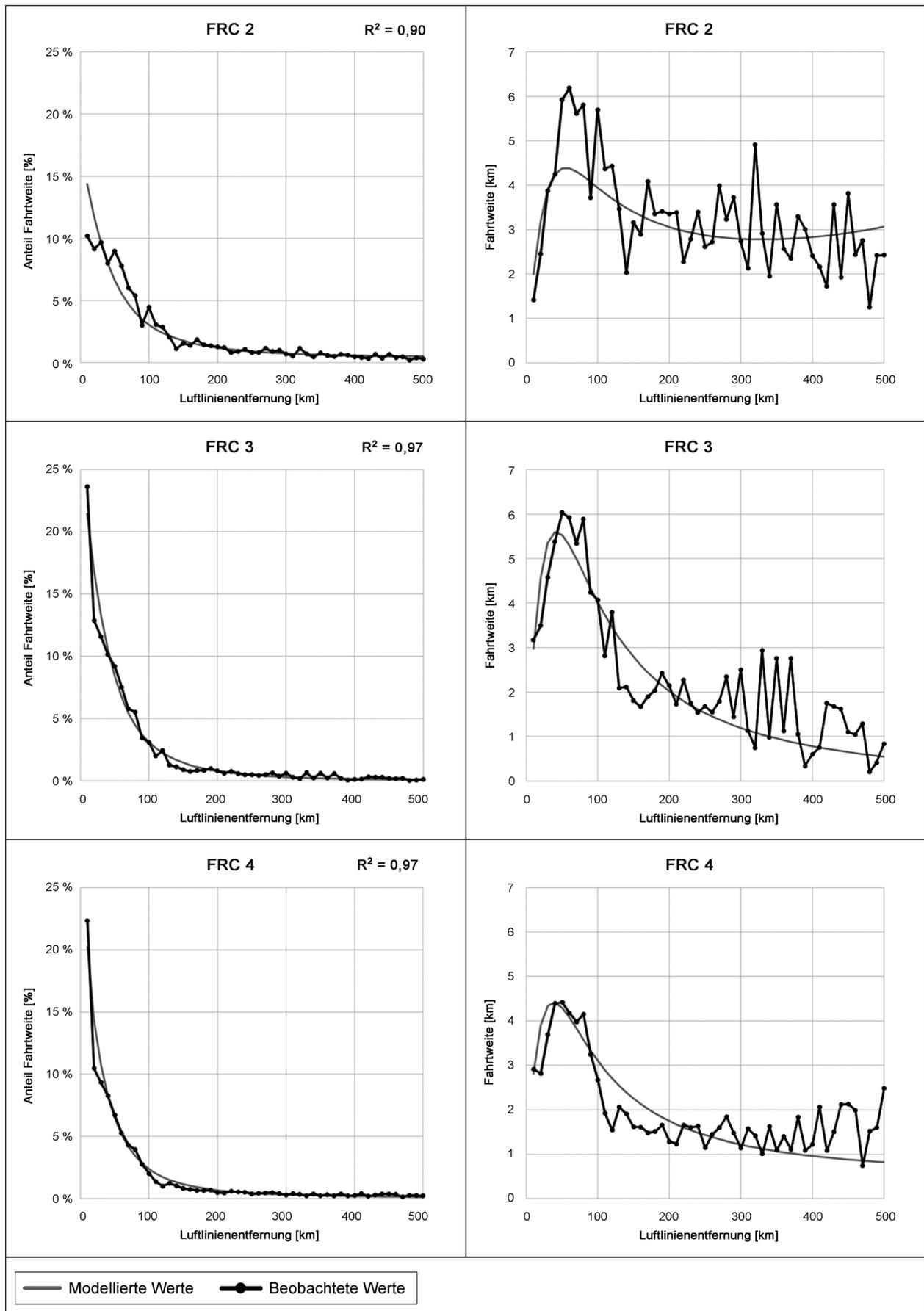


Bild 7-24: Anteil der Fahrtweite (links) und absolute Fahrtweite (rechts) je Entfernungsklasse für FRC 2, FRC 3 und FRC 4

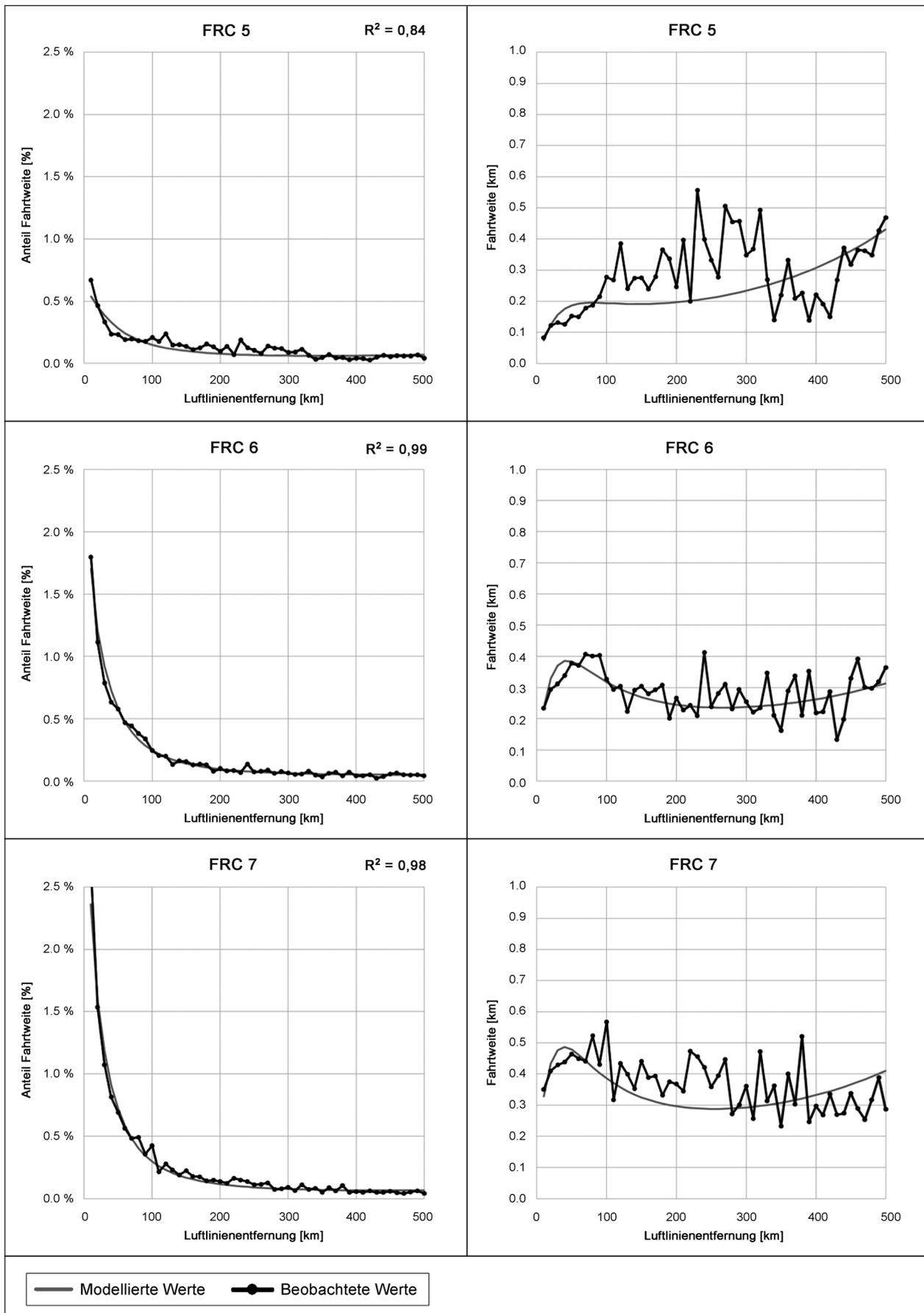


Bild 7-25: Anteil der Fahrtweite (links) und absolute Fahrtweite (rechts) je Entfernungsklasse für FRC 5, FRC 6 und FRC 7

$$t^{Anb}(l^{Luft}) = 0,0166 \cdot \log 10(l^{Luft}) + 0,0655$$

mit

$$t^{Anb}(l^{Luft}) \quad \text{Funktion zur Abschätzung der Anbindungszeit [h]} \\ \text{einer Relation mit der Luftlinienentfernung } l^{Luft}$$

$$l^{Luft} \quad \text{Luftlinienentfernung [km] zwischen Start- und Zielpunkt}$$

Bild 7-26: Funktion für die Berechnung der Anbindungszeit zwischen 0 und 150 km Luftlinienweite

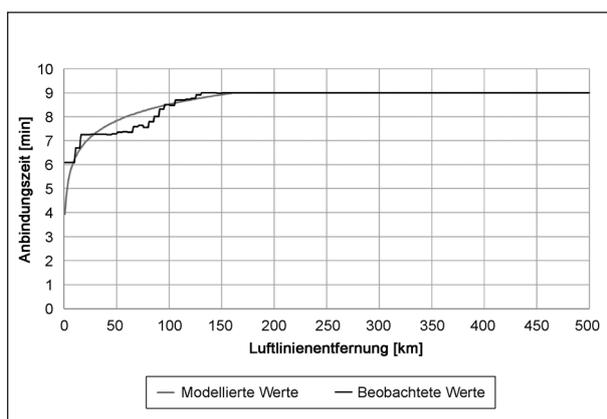


Bild 7-27: Anbindungszeit je Entfernungsklasse für beobachtete und modellierte Werte

## Anbindungszeit

Um Reisezeiten zu erhalten, muss zusätzlich zu den Fahrtzeiten in den jeweiligen FRC eine Anbindungszeit hinzuaddiert werden. Die Anbindungszeit hängt direkt von der Lage und der baulichen Struktur des Gebietes ab. Bei höherer Baudichte steigt die Anbindungszeit (siehe Kapitel 2.3.5). Da die untersuchten Relationen mit höherer Luftlinienentfernung nur Relationen in Oberzentren und Metropolregionen umfassen, steigt die Anbindungszeit mit der Luftlinienentfernung. Die Funktion für die Berechnung der Anbindungszeit ist in Bild 7-26 dargestellt. Ab 150 km Luftlinienweite wird die Anbindungszeit konstant mit 9 Minuten angenommen.

## Fahrtweiten und Reisezeiten einer Relation

Um die Pkw-Reisezeit einer Relation für einen Verkehrszustand  $z$  (Schwachverkehrszeit, Hauptverkehrszeit ohne Störungen, Hauptverkehrszeit mit Störungen) und für eine Qualitätsstufe  $k$  (SAQ A bis F) mit einer Funktion aus der Luftlinienentfernung zu berechnen, werden, wie in Bild 7-28 dargestellt, Funktionen für die Fahrtweite und spezifische Parameter für die Fahrtgeschwindigkeiten miteinander verknüpft:

$$t_{k,z}^{Reise}(l^{Luft}) = \sum_{FRC} \frac{l_k^{Fahrt}(l^{Luft}) \cdot p_{FRC}^{Fahrt}(l^{Luft}) \cdot f_{k,z}^{Konst}}{v_{FRC,z}^{Fahrt}} + t^{Anb}(l^{Luft})$$

$$l_k^{Fahrt}(l^{Luft}) = l^{Luft} \cdot f_k^{Umweg}(l^{Luft})$$

mit

$$t_{k,z}^{Reise}(l^{Luft}) \quad \text{Funktion zur Abschätzung der Pkw-Reisezeit [h] einer Relation mit der Luftlinienentfernung } l^{Luft} \text{ im Verkehrszustand } z \text{ bei einer Qualitätsstufe } k$$

$$l_k^{Fahrt}(l^{Luft}) \quad \text{Funktion zur Abschätzung der Fahrtweite [km] einer Relation mit der Luftlinienentfernung } l^{Luft} \text{ bei einer Bewertung der Umwegigkeit mit der Qualitätsstufe } k$$

$$p_{FRC}^{Fahrt}(l^{Luft}) \quad \text{Funktion zur Abschätzung des Längenanteils der Straßenfunktionsklasse FRC an der Fahrtweite einer Relation mit der Luftlinienentfernung } l^{Luft}$$

$$f_k^{Umweg}(l^{Luft}) \quad \text{Funktion des Umwegfaktors für die } k. \text{ SAQ-Kurve}$$

$$t^{Anb}(l^{Luft}) \quad \text{Funktion zur Abschätzung der Anbindungszeit [h] einer Relation mit der Luftlinienentfernung } l^{Luft}$$

$$f_{k,z}^{Konst} \quad \text{Faktor zur Anpassung der Fahrtzeit abhängig von der Qualitätsstufe } k \text{ und vom Verkehrszustand } z$$

$$v_{FRC,z}^{Fahrt} \quad \text{Pkw-Fahrtgeschwindigkeit [km/h] auf einer Straße der Straßenfunktionsklasse FRC im Verkehrszustand } z$$

$$l^{Luft} \quad \text{Luftlinienentfernung [km] zwischen Start- und Zielpunkt}$$

$$k \quad \text{Index für die } k. \text{ SAQ-Kurve}$$

Bild 7-28: Funktion für die Berechnung der Fahrtweite und Reisezeit einer Relation in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung

- Die Fahrtweite  $I_k^{Fahrt}$  einer Relation ergibt sich aus der Multiplikation der Luftlinienentfernung mit einem Umwegfaktor. Um unterschiedliche Qualitätsstufen der Angebotsqualität zu berücksichtigen, wird der Umwegfaktor entsprechend der Funktion in Bild 7-19 abhängig von der Qualitätsstufe  $k$  bestimmt.
- Die spezifische Fahrtweite einer Straßenfunktionsklasse FRC ergibt sich aus dem Produkt der Fahrtweite und dem Anteil  $p_{FRC}^{Fahrt}$  der Straßenfunktionsklasse entsprechend der Funktion in Bild 7-21.
- Die spezifische Pkw-Fahrtzeit auf einer Straßenfunktionsklasse FRC ergibt sich aus einer spezifischen Pkw-Fahrtgeschwindigkeit  $v_{FRC,z}^{Fahrt}$ , die zusätzlich zur FRC den Verkehrszustand  $z$  berücksichtigt.
- Um eine bessere Übereinstimmung mit den empirischen Bewertungsfunktionen zu erzielen, wird die Fahrtzeit mit einem Faktor  $f_{k,z}^{Konst}$  korrigiert, der von der Qualitätsstufe  $k$  und dem Verkehrszustand  $z$  abhängt.

Aus der Reisezeit ergibt sich dann die Luftliniengeschwindigkeit.

### Festlegung einer Fahrtgeschwindigkeit für jeden Verkehrszustand und FRC

Für die Berechnung der Luftliniengeschwindigkeit wird jeder FRC für jeden Verkehrszustand  $z$  eine mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit zugeordnet. Die Festlegung dieser Fahrtgeschwindigkeit orientiert sich an den angestrebten Fahrtgeschwindigkeiten nach RIN (2008, Tabelle 13). Diese Fahrtgeschwindigkeiten werden durch manuelle Setzungen so angepasst, dass die Luftliniengeschwindigkeiten der empirischen Bewertungsfunktionen für die drei Verkehrszustände und die fünf Bewertungsfunktionen möglichst gut getroffen werden. Tabelle 7-5 zeigt das Ergebnis dieser Setzung. Um eine gute Übereinstimmung zwischen den empirischen Bewertungsfunktionen und den theoretischen Bewertungsfunktionen zu erreichen, werden folgende Anpassungen vorgenommen:

- Bei FRC 0 werden zwei Entfernungsbereiche (Nahbereich und Fernbereich) unterschieden. Im Nahbereich werden niedrigere Geschwindigkeiten als im Fernbereich gewählt. So kann berücksichtigt werden, dass Störungen vor allem den Nahbereich betreffen und bei längeren Fahrtweiten kompensiert werden können. Bei der FRC 1 genügt es die Geschwindigkeiten im Zustand mit Störungen zu reduzieren. Die beste Übereinstimmung ergibt sich, wenn der Nahbereich bis zu einer Luftlinienentfernung von 70 km

Straßenkategorie	FRC	Luftlinienentfernung [km]	Fahrtgeschwindigkeit [km/h]			
			RIN (Tabelle 13)	HVZ mit Störungen	HVZ ohne Störungen	SVZ
AS 0/I	0	0 – 70	90 – 110	85	98	111
AS 0/I	0	120 – 500		93	112	117
AS II oder LS I	1	0 – 70	80 – 100	65	90	90
AS II oder LS I	1	120 – 500		70	90	90
LS II	2	0 – 500	60 – 70	60	70	70
LS III	3	0 – 500	50 – 60	60	70	70
VS II	4	0 – 500	40 – 60	40	50	60
VS III	5	0 – 500	30 – 50	35	40	50
HS III + IV	6	0 – 500	15 – 25	25	30	30
	7	0 – 500		10	10	10

Tab. 7-5: Zuordnung von Fahrtgeschwindigkeiten zu FRC (angelehnt an Tabelle 13, RIN (2008))

SAQ-Kurve $k$	Verkehrszustand $z$		
	Schwachverkehrszeit	Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen	Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen
A/B	1,00	1,01	1,01
B/C	1,00	1,02	1,03
C/D	1,00	1,03	1,05
D/E	1,00	1,04	1,07
E/F	1,00	1,05	1,09

Tab. 7-6: Faktor  $f_{k,z}^{Konst}$  zur Anpassung der Fahrzeit anhängig von der Qualitätsstufe  $k$  und vom Verkehrszustand  $z$

definiert wird und der Fernbereich ab 120 km. Zwischen beiden Bereichen wird ein linearer Anstieg der Geschwindigkeiten angenommen.

- Die Fahrzeiten werden für die Verkehrszustände in der Hauptverkehrszeit mit den in Tabelle 7-6 dargestellten Faktoren erhöht. Diese Erhöhung ist erforderlich, da die Qualitätsstufen der Luftliniengeschwindigkeiten nicht allein über die Qualitätsstufen der Umwegfaktoren erklärt werden können.

## 7.2.2 Ergebnisse der Schätzung

Bild 7-30 bis Bild 7-32 zeigen die Ergebnisse der abgeleiteten SAQ-Referenzkurven B/C für drei Ausprägungen der Fahrzeit, die sich bei Nutzung der entsprechenden Fahrtgeschwindigkeiten aus Tabelle 7-5 ergeben:

- Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen,
- Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen und
- Schwachverkehrszeit.

In Bild 7-29 sind B/C-Kurven für die drei Ausprägungen der Fahrzeit und für die zwei Ansätze (Nutzung empirischer und theoretischer Reisezeiten) dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Referenzkurven aus empirischen und theoretischen Reisezeiten ähnliche Verläufe aufweisen, wenn die in Tabelle 7-5 ausgewiesenen Fahrtgeschwindigkeiten genutzt werden.

Bild 7-30 bis Bild 7-32 enthalten folgende Informationen:

- Die SAQ-Kurven aus den empirischen Werten als gestrichelte graue Linien. Die B/C-Kurve ist dicker dargestellt. In allen drei Bildern wird eine Spreizung der Kurven gewählt, bei der etwa 1/6 der Relationen in die Qualitätsstufe SAQ = A (A = 16,5 %) fallen.
- Die SAQ-Kurven aus den theoretischen Reisezeiten als schwarze Linien. Die B/C-Kurve ist dicker dargestellt.

- Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen (Bild 7-30):

$$t = \text{MAX} \left( t_{TomTom,07:00}^{P50}, t_{TomTom,17:00}^{P50} \right)$$

- Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen (Bild 7-31):

$$t = \text{MAX} \left( t_{TomTom,07:00}^{P75}, t_{TomTom,17:00}^{P75} \right)$$

- Schwachverkehrszeit (Bild 7-32):

$$t = t_{TomTom,20:00}^{P50}$$

SAQ-Referenzkurven B/C

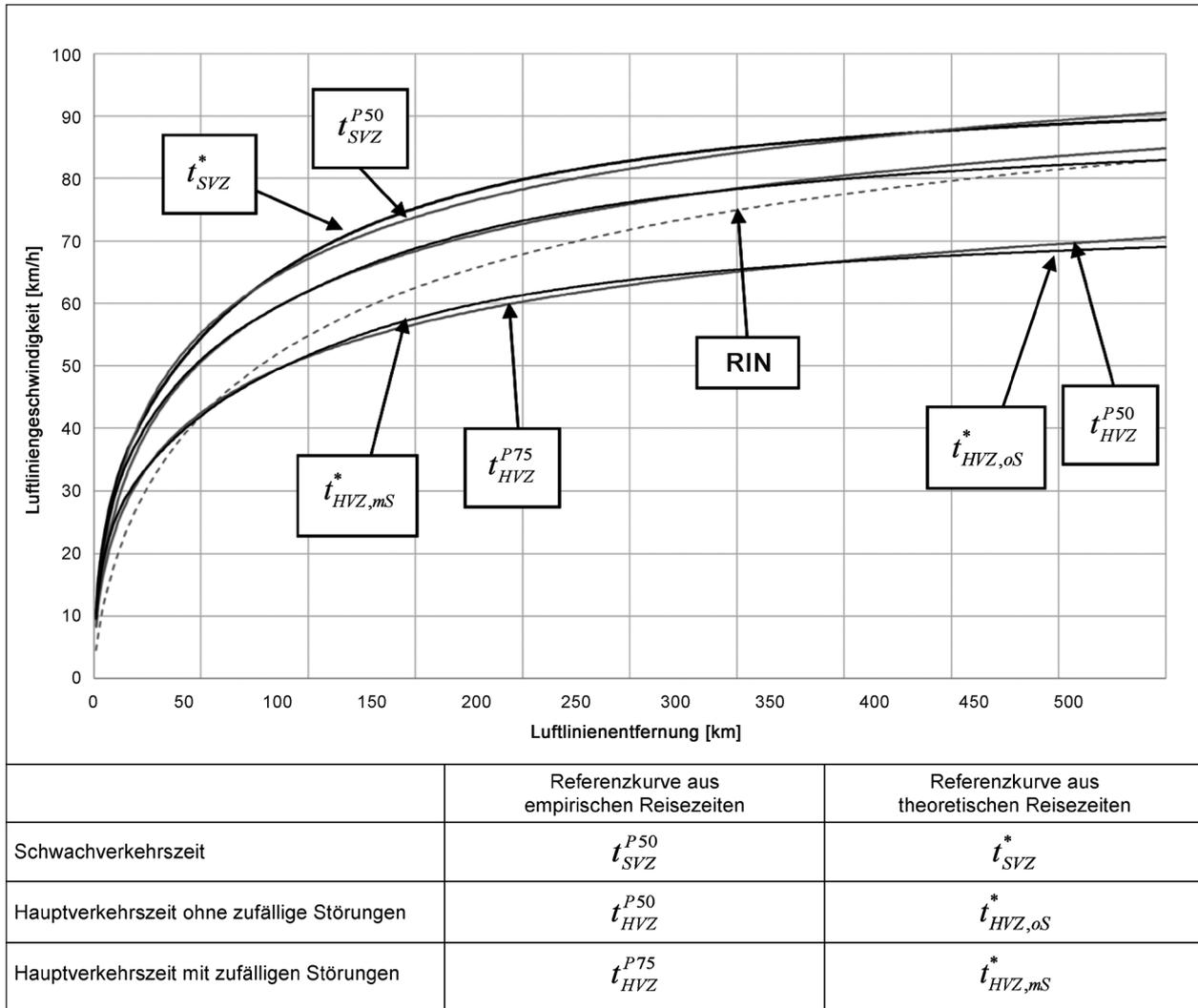


Bild 7-29: Vergleich der Referenzkurven B/C aus empirischen Reisezeiten und theoretischen Reisezeiten im Entfernungsbereich 0-500 km

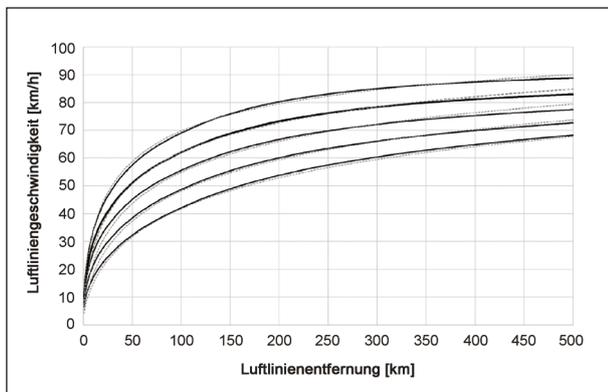


Bild 7-30: Theoretische SAQ-Referenzkurven Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen

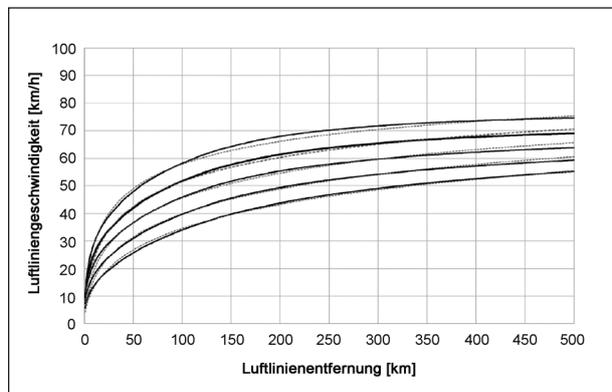


Bild 7-31: Theoretische SAQ-Referenzkurven Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen

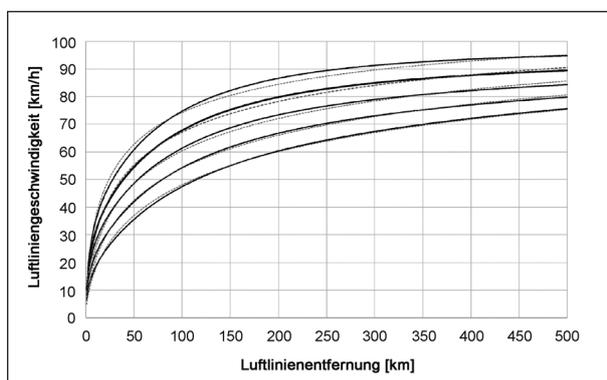


Bild 7-32: Theoretische SAQ-Referenzkurven Schwachverkehrszeit

### 7.3 Fazit Referenzkurven

Die Ergebnisse zu den Referenzkurven für die Bewertung der Luftliniengeschwindigkeit im Pkw-Verkehr lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Als repräsentative Fahrtzeit für die Schwachverkehrszeit wird der Median der Fahrtzeiten in der Schwachverkehrszeit vorgeschlagen.
- Als repräsentative Fahrtzeit für die Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen wird der Median der Fahrtzeiten in der Hauptverkehrszeit (Maximum aus mHVZ und aHVZ) vorgeschlagen.
- Als repräsentative Fahrtzeit für die Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen wird das 75%-Perzentil der Fahrtzeiten in der Hauptverkehrszeit (Maximum aus mHVZ und aHVZ) vorgeschlagen.
- Für den Vergleich der vorgeschlagenen Referenzkurven und der RIN-Referenzkurven werden die Fahrtzeiten in der Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen herangezogen.
- Die vorgeschlagenen Referenzkurven führen zu anspruchsvolleren Bewertungen als die bisherigen RIN-Referenzkurven. Der Unterschied liegt bei etwa einer Bewertungsstufe. Der Unterschied sinkt mit zunehmender Luftlinienentfernung.
- Die Referenzkurven können nicht nur aus empirischen Werten mit Vorgaben zur Klassenbesetzung, sondern auch aus theoretisch abgeleiteten Fahrtzeiten bestimmt werden. Die theoretisch abgeleiteten Fahrtzeiten berücksichtigen die Eigenschaften des Netzes (typische Fahrt-

geschwindigkeiten je Straßenkategorie) und die Eigenschaften einer Verbindung (Umwegigkeit, Reiseweite je Straßenkategorie). Die Kurven aus den empirischen Werten können durch die Wahl typischer Umwegfaktoren und typischer Fahrtgeschwindigkeiten relativ gut reproduziert werden. Das bestätigt, dass die Verbindungsqualität das Ergebnis grundlegender Eigenschaften des Netzes (Umwegigkeit) und seiner Straßenkategorien (Geschwindigkeit) ist.

- Die theoretischen Referenzkurven eignen sich damit für die Nutzung in zukünftigen RIN, da sich diese Richtlinien mit dem Zusammenhang von Netzgestaltung und Verkehrswegegestaltung befassen. Mit den theoretischen Referenzkurven lassen sich beispielsweise die Wirkungen netzweiter Änderungen der angestrebten Pkw-Fahrtgeschwindigkeit auf die Bewertungsfunktionen ermitteln. Netzweite Änderungen der angestrebten Pkw-Fahrtgeschwindigkeit kann es bei Änderungen der zulässigen Geschwindigkeiten (Tempolimit auf Autobahnen, andere Regelgeschwindigkeit innerorts) geben.

## 8 Zusammenfassung und Fazit

Die Zusammenfassung der Vorgehensweise und der Projektergebnisse erfolgt anhand der vier wesentlichen Projektziele.

### 8.1 Vergleich von Fahrtzeitdaten unterschiedlicher Datenquellen

#### Ziel

Es sollten verbindungsbezogene Fahrt- und Reisezeiten im Straßenverkehr mit verschiedenen Methoden (modell- und empiriegestützt) und Datenquellen ermittelt und verglichen werden.

#### Vorgehensweise

Um die Aussagekraft unterschiedlicher Datenquellen und Datenanbieter zu untersuchen, wurden Fahrtzeiten für 16 ausgewählte Relationen mit drei unterschiedlichen Methoden und fünf Datenquellen ermittelt:

1. Fahrtzeiten aus dem Verkehrsnachfragemodell PTV-Validate.

2. Streckenbasierte Fahrtzeiten aus FCD der Anbieter HERE, INRIX und TomTom.
3. Relationsbasierte Fahrtzeiten aus FCD des Anbieters Google.

Um die Qualität der Fahrtzeitdaten der Datenanbieter zu validieren, wurden zusätzlich für zwei Relationen mit ANPR-Systemen gemessene Fahrtzeiten mit den Fahrtzeitdaten der untersuchten Datenquellen verglichen.

### Ergebnis

Die Anbieter liefern Fahrtzeitdaten in unterschiedlichen Ausprägungen. Während TomTom und HERE den Mittelwert und Perzentile ausweisen, liefert INRIX einen Wert, der auf historischen Messdaten und einer Kurzfristvorhersage (Speed Optimized Estimate) beruht. Google liefert drei Vorhersagewerte (Best-Guess, Optimistic, Pessimistic). Der Vergleich der Datenquellen zeigt für die Stichprobe der 16 Relationen Folgendes:

- Die Google-Best-Guess-Fahrtzeiten und die INRIX-Fahrtzeiten liegen näher am 75%-Perzentil von HERE und TomTom als am Median. Dies lässt vermuten, dass bei der internen Datenaufbereitung bei Google und INRIX nicht der Median, sondern ein höheres Perzentil verwendet wird:

$$t_{HERE}^{P50} \approx t_{TomTom}^{P50} < t_{Google}^{Best} \approx t_{INRIX} < t_{HERE}^{P75} < t_{TomTom}^{P75}$$

- Während der Median bei TomTom und HERE ähnliche Werte aufweist, liefern der Mittelwert und Perzentile > 50 % bei TomTom längere Fahrtzeiten als bei HERE.

$$t_{HERE}^{P50} \approx t_{TomTom}^{P50} \text{ und } t_{HERE}^{Mean} < t_{TomTom}^{Mean} \text{ und } t_{HERE}^{P75} < t_{TomTom}^{P75}$$

- Die Google-Optimistic-Fahrtzeiten entsprechen in etwa dem Median von TomTom und HERE:

$$t_{HERE}^{P50} \approx t_{TomTom}^{P50} \approx t_{Google}^{Opt}$$

- Das Verkehrsnachfragemodell liefert im belasteten Zustand Fahrtzeiten, die am besten mit den 90%-Perzentilen der FCD in der Hauptverkehrszeit übereinstimmen. Im unbelasteten Zustand stimmen die Fahrtzeiten am besten mit dem Median der FCD in der Nebenverkehrszeit überein.
- Werden die Fahrtzeitdaten einer Datenquelle zur Ermittlung von Verlustzeiten genutzt (Soll-

Fahrtzeit und Ist-Fahrtzeit aus einer Quelle), dann können sich deutlich unterschiedliche Werte zwischen den Datenquellen ergeben.

Als Fazit der Validierung lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- Die mit ANPR gemessenen Fahrtzeitdaten und die von Google prognostizierten Fahrtzeitdaten stimmen für den Erhebungstag am besten überein, wenn bei den gemessenen Fahrtzeiten der Median oder das 40%-Perzentil herangezogen wird.
- Bei den Datenquellen HERE und TomTom liefert der Median die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Fahrtzeitdaten.
- Die Google-Fahrtzeitdaten stimmen zu den meisten Tageszeiten gut mit den gemessenen Fahrtzeiten überein. Bei Änderungen der Fahrtzeiten weisen die Google-Daten eine gewisse zeitliche Verzögerung auf.
- Wenn Perzentile der Fahrtzeit über mehrere Teilstrecken aufsummiert werden, dann werden bei Perzentilen > 50 % die Fahrtzeiten überschätzt.

Die Aufsummierung von Fahrtzeitperzentilen ist eine Einschränkung, die bei der Nutzung von streckenbasierten FCD beachtet werden muss. Vermutlich ist der Fehler einer Aufsummierung kleiner, wenn die Perzentile eines langen Zeitraums (z. B. ein Jahr) genutzt werden. Um die Fehler einer Aufsummierung zu quantifizieren, müssten komplette FCD-Trajektorien ausgewertet werden.

## 8.2 Aufbau einer Datenbasis

### Ziel

Es sollte eine allgemein zugängliche Datenbasis für verbindungsbezogene Fahrt- und Reisezeiten zwischen zentralen Orten (Metropolregionen, Oberzentren, Mittelzentren) zur Beurteilung der Zeitdaten anderer Datenquellen erstellt werden.

### Vorgehensweise

Für die Datenbasis wurden 21.582 Relationen ausgewählt. Sie umfassen alle Relationen der Verbindungsfunktionsstufen 0 bis II (ca. 17.200 Relationen) und zusätzlich etwa 1.500 Relationen in kurzen Entfernungsbereichen bis 15 km sowie 2.900

Relationen in langen Entfernungsbereichen > 125 km. Für die ausgewählten Relationen werden Fahrzeitdaten mit drei Datenquellen ermittelt (Verkehrsnachfragemodell, Google, TomTom). Folgende Fahrzeitausprägungen werden bereitgestellt:

- Datenquelle Verkehrsnachfragemodell (PTV-Validate):
  - Fahrtzeit unbelastet und belastet
  - Modus Pkw
- Datenquelle streckenbezogene FCD (TomTom):
  - Fahrtzeiten für 4 Tageszeiten (07:00, 10:00, 17:00, 20:00 Uhr)
  - Perzentile 50 %, 75 % und 90 % sowie Mittelwert
  - Modus Pkw und Lkw
- Datenquelle relationsbezogene FCD (Google):
  - Fahrtzeiten für 9 Tageszeiten (04:00, 06:00, 07:00, 08:00, 10:00, 14:00, 17:00, 18:00, 20:00 Uhr)
  - Zustände Best-Guess, Pessimistic und Optimistic
  - Modus Pkw

## Ergebnis

Die Datenbasis liegt als Excel-Datei vor.

Eine Analyse der Fahrtzeiten zeigt bei beiden FCD-Quellen (TomTom und Google) einen relativ kleinen Einfluss der Tageszeit auf die Fahrtzeit bzw. die Fahrtgeschwindigkeit. Um dieses unerwartete Ergebnis zu verstehen, wurden die Fahrtzeiten der Datenquelle TomTom auf Streckenebene analysiert. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass durch die Auswahl der Relationen die Strecken in Ballungsräumen unterrepräsentiert sind. Das führt dazu, dass die tatsächlichen Verlustzeiten pro Kilometer für eine durchschnittliche Pkw-Fahrt höher sind, als für eine durchschnittliche Relation aus der Menge der ausgewählten Relationen.

## 8.3 Konzept zur Vergleichbarkeit der Datenquellen

### Ziel

Aufbauend auf dem Vergleich der Methoden und Datenquellen sollte ein Konzept entwickelt werden,

mit dem die Zeitdaten einer Datenquelle beurteilt und ggf. korrigiert werden können. Ausgangspunkt ist eine RIN-Anwendung, in der Fahrt- bzw. Reisezeitdaten aus einer beliebigen Datenquelle für die Bewertung der Angebotsqualität genutzt werden sollen. Den RIN-Anwendenden soll eine praktikable Methode angeboten werden, die eine Einordnung der Fahrzeitdaten ihrer Datenquelle ermöglicht. Den RIN-Anwendenden werden hierfür die in diesem Projekt ermittelten Fahrzeitdaten als Referenzfahrzeitdaten zur Verfügung gestellt.

### Vorgehensweise

Um die Vergleichbarkeit einer beliebigen Analyse-datenquelle QA und einer Referenzdatenquelle QR zu überprüfen, wird ein zweistufiges Vorgehen vorgeschlagen:

1. Validierung der Analysedatenquelle: Es wird die Übereinstimmung der Fahrzeitdaten verglichen. Für diesen Vergleich werden die SAQ-Werte herangezogen. Für die Validierung der Analysedatenquelle werden die fünf SAQ-Kurven der RIN um zwei weitere SAQ-Kurven A+/A und F/F+ erweitert. Diese 7 SAQ-Kurven werden dann für jede SAQ in vier gleichabständige Unterklassen unterteilt. Auf diese Weise entstehen 25 SAQ-Kurven ( $7 + 6 \times 3 = 25$ ). Diese 25 SAQ-Kurven definieren 24 SAQ-Bereiche, die von jeweils zwei SAQ-Kurven begrenzt werden. Die feinere Unterteilung ermöglicht genauere Aussagen zu den Abweichungen bei den SAQ-Werten zwischen der Analyse- und der Referenzdatenquelle. Um die Übereinstimmung zu quantifizieren, wird vorgeschlagen, die mittlere quadratische Abweichung der SAQ-Werte bei Verwendung der 24-stufigen Skala zu ermitteln. Eine ausreichende Übereinstimmung kann nun normativ gesetzt werden. Geht man davon aus, dass eine ausreichende Übereinstimmung dann gegeben ist, wenn eine Bewertung nach RIN im Mittel um weniger als einen halben SAQ-Wert abweicht, dann sollte ein maximaler Wert für das Abstandsmaß auf 1,5 oder 2,0 gesetzt werden.
2. Anpassung der Analysefahrzeitdaten: Falls die Validierung der Analysedatenquelle eine unzureichende Übereinstimmung der Datenquellen ergibt, dann können die Analysefahrzeitdaten für die RIN-Bewertung angepasst werden. Dafür wird eine Funktion mit drei Anpassungsparametern vorgeschlagen. Die Anpassungsparameter

sind so zu bestimmen, dass das Abstandsmaß minimal wird.

## Ergebnis

Ein Konzepttest an Fahrzeitausprägungen verschiedener Datenquellen zeigt, dass die Fahrzeitkorrektur nur dann eine Verbesserung bringen kann, wenn die Fahrzeiten der Referenzdatenquelle für die meisten Relationen entweder größer oder kleiner sind als die Fahrzeiten der Analysedatenquelle. Die Anpassungsfunktion kann zwar systematische relative und absolute Abweichungen korrigieren, relationsspezifische Unterschiede jedoch nicht.

## 8.4 Ermittlung von Referenzkurven

### Ziel

Es sollten Referenzkurven zur Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität für die Fortschreibung der RIN erstellt werden.

### Vorgehensweise

Es werden Referenzkurven für die sektorale Bewertung im Pkw-Verkehr und im Lkw-Verkehr vorgeschlagen. Grundlage für die Ermittlung der Referenzkurven war die erstellte Datenbasis. Es wurden drei Bewertungskurven geschätzt:

- Luftliniengeschwindigkeit in der Neben- oder Schwachverkehrszeit: Diese Bewertung basiert auf Fahrzeiten ohne größere Zeitverluste durch Kapazitätsengpässe. „Die Verwendung der Fahrzeiten in den Nebenverkehrszeiten ist dann angezeigt, wenn geprüft wird, ob zum Erreichen eines zentralen Ortes grundsätzlich eine geeignete Verbindung im Netz verfügbar ist“ (RIN, Seite 20).

Als repräsentative Fahrzeit für die Schwachverkehrszeit wird der Median der Fahrzeiten in der Schwachverkehrszeit vorgeschlagen.

- Luftliniengeschwindigkeit in der Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen: Diese Bewertung basiert auf den Fahrzeiten in der Hauptverkehrszeit, in der in Teilen des Netzes Zeitverluste durch Kapazitätsengpässe auftreten. Um eine Unterscheidung in morgendliche und abendliche Hauptverkehrszeit zu vermeiden, wird für die

Schätzung der Kurven das Maximum aus beiden Zeiträumen herangezogen. „Die Verwendung der Fahrzeiten in den Hauptverkehrszeiten ist dann angezeigt, wenn geprüft wird, ob eine solche Verbindung für die Verkehrsnachfrage ausreichend bemessen ist“ (RIN, Seite 20).

Als repräsentative Fahrzeit für die Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen wird der Median der Fahrzeiten in der Hauptverkehrszeit (Maximum aus mHVZ und aHVZ) vorgeschlagen.

- Luftliniengeschwindigkeit in der Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen: Diese Bewertung basiert auf den Fahrzeiten in der Hauptverkehrszeit, bei der zufällige Störungen auftreten. Damit sind Aussagen zur Zuverlässigkeit möglich.

Als repräsentative Fahrzeit für die Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen wird das 75%-Perzentil der Fahrzeiten in der Hauptverkehrszeit (Maximum aus mHVZ und aHVZ) vorgeschlagen.

Die Parameter der Referenzkurven wurden mit zwei Ansätzen bestimmt. Im ersten Ansatz wurden die empirischen Reisezeiten der Datenbasis für die Schätzung der Parameter genutzt. Im zweiten Ansatz wurden für die Parameterschätzung Reisezeiten aus typischen Eigenschaften des Verkehrsnetzgesetzes abgeleitet.

### Ergebnis

- Die vorgeschlagenen Referenzkurven führen zu anspruchsvolleren Bewertungen als die bisherigen RIN-Referenzkurven. Der Unterschied liegt bei etwa einer Bewertungsstufe. Der Unterschied sinkt mit zunehmender Luftlinienentfernung.
- Die Referenzkurven können nicht nur aus empirischen Werten mit Vorgaben zur Klassenbesetzung, sondern auch aus theoretisch abgeleiteten Fahrzeiten bestimmt werden. Die theoretisch abgeleiteten Fahrzeiten berücksichtigen die Eigenschaften des Netzes (typische Fahrgeschwindigkeiten je Straßenkategorie) und die Eigenschaften einer Verbindung (Umwegigkeit, Reiseweite je Straßenkategorie). Die Kurven aus den empirischen Werten können durch die Wahl typischer Umwegfaktoren und typischer

Fahrtgeschwindigkeiten relativ gut reproduziert werden. Das bestätigt, dass die Verbindungsqualität das Ergebnis grundlegender Eigenschaften des Netzes (Umwegigkeit) und seiner Straßenkategorien (Geschwindigkeit) ist.

- Die theoretischen Referenzkurven eignen sich damit für die Nutzung in zukünftigen RIN, da sich diese Richtlinien mit dem Zusammenhang von Netzgestaltung und Verkehrswegegestaltung befassen.

## 8.5 Fazit

Wie in der Zusammenfassung dargestellt, konnten die angestrebten Projektziele erreicht werden. Folgende Punkte sind für eine Bewertung der Verbindungsqualität oder speziell für eine Weiterentwicklung der RIN von Bedeutung:

- ÖV-Reisezeiten: Im Projekt wurden keine ÖV-Reisezeiten betrachtet. Deshalb konnten keine Referenzkurven für eine integrierte Bewertung der Luftliniengeschwindigkeit und für das Reisezeitverhältnis ÖV/Pkw ermittelt werden.
- Auswahl der Relationen: Die rund 21.500 ausgewählten Relationen sind nicht repräsentativ für die tatsächliche Verkehrsnachfrage in Deutschland. Das liegt zum einen an der Methodik der RIN, die bewusst auf die Bedeutung einer Relation setzt und nicht auf die tatsächliche Nachfrage. Zum anderen liegt es daran, dass für das Projekt vorrangig Relationen der Verbindungsfunktionsstufen 0 bis II ausgewählt wurden. Relationen der Verbindungsfunktionsstufen III und IV haben im Alltagsverkehr eine große Bedeutung.
- Ermittlung von Fahrtzeiten für Routen: Die räumliche Aggregation der Fahrtzeitdaten von Teilstrecken zu längeren Entfernungen ist für mittlere Fahrtzeiten durch einfache Aufsummierung möglich. Eine Aufsummierung von Perzentilen der Fahrtzeit über mehrere Teilstrecken liefert jedoch keine korrekten Ergebnisse. Auf einem Streckenzug, auf dem sich Fahrzeuge im Verkehrszustand „Stop-and-Go“ bewegen, wird sich ein Fahrzeug auf einer Teilstrecke relativ lange aufhalten und deshalb dem Perzentil P90 zugeordnet. Sobald das Fahrzeug im Stau aufrückt, wird es die folgende Teilstrecke mit einer etwas höheren Geschwindigkeit befahren und deshalb einem Perzentil zugeordnet, das unterhalb des

Perzentils P90 % liegt. Es ist deshalb wahrscheinlich, dass sich bei gestauten Verkehrszuständen die hohen Perzentile auf den Teilstrecken eines Streckenzugs immer aus anderen Fahrzeugen zusammensetzen. Eine Aufsummierung von Perzentilen der Fahrtzeit wird die Fahrtzeit deshalb vermutlich überschätzen. Trotzdem wurden als Grundlage für die Bewertung der Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen die Perzentile P75 und P90 für die Datenbasis berechnet.

- Dynamische Fahrtzeitberechnung: Bei Fahrtzeiten von über einer Stunde ergeben sich bei der statischen Fahrtzeitberechnung Fehler, da dann die Geschwindigkeiten des folgenden Zeitraums herangezogen werden müssen. Bei der dynamischen Fahrtzeitberechnung werden die Geschwindigkeitsdaten des Zeitraums genutzt, in dem sich eine Zeit-Weg-Trajektorie mit einem vorgegebenen Abfahrtszeitpunkt gerade befindet. Da in diesem Projekt Geschwindigkeitsdaten nur für vier Ein-Stunden-Zeiträume zur Verfügung stehen, konnte keine realistische dynamische Fahrtzeitberechnung durchgeführt werden.
- Belastbarkeit der Datenquellen: FCD sind eine wertvolle Datenquelle zur Ermittlung von Fahrtzeiten. Allerdings sind die Aufbereitungsprozesse der kommerziellen FCD-Anbieter für Dritte nicht nachvollziehbar. Die in Kapitel 3 durchgeführten Vergleiche zeigen, dass sich die Fahrtzeiten der Anbieter zum Teil und insbesondere bei den höheren Perzentilen deutlich unterscheiden.

Die Ergebnisse sollen als Basis für weitere Diskussionen zur Fortschreibung der RIN 2008 in den zuständigen Gremien dienen.

## Literatur

- © OpenStreetMap-Mitwirkende:  
<http://www.openstreetmap.de> bzw.  
<http://www.openstreetmap.org>.
- BENNECKE, A.; FRIEDRICH, B.; FRIEDRICH, M.; LOHMILLER, J. (2011): Time-dependent Service Quality of Network Sections, *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 16, S. 364–373. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.04.457.
- BMVI (2017): Verkehr in Zahlen 2017/18, 45. aktualisierte Neuauflage, revidierte Ausgabe, Hamburg: DVV Media Group.
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J. (2007): Modellierung von Dauerlinien und Ganglinien der Verkehrsnachfrage im Autobahnnetz, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum.
- BRILON, W.; ZURLINDEN, H. (2003): Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 870.
- DAGANZO, C. F. (1994): The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory, *Transportation Research Part B: Methodological* 28 Heft 4, S. 269–287. DOI: 10.1016/0191-2615(94)90002-7.
- Department for Transport (2014): ed. TAG UNIT M3.1. Highway Assignment Modelling. Online verfügbar unter [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)., zuletzt geprüft am 18.06.2018.
- DO-IT (2008. Bild 1): Nutzung von Mobilfunkdaten für das Verkehrsmanagement – das Projekt Do-IT, Beilage Nr. 5 zur Straßenverkehrstechnik, Projektträger Mobilität und Verkehr, Bauen und Wohnen (TÜV Rheinland Group).
- RIN (FGSV 2008. Bild 32), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV(Hrsg.): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung RIN, Köln.
- RIN (2008), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV(Hrsg.): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung RIN, Köln.
- HBS (2015), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV(Hrsg.): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS, Köln.
- FRIEDRICH, B.; BENNECKE, A.; FRIEDRICH, M.; LOHMILLER, J. (Hg.) (2015): Zeitabhängige Bewertung der Verbindungsqualität und der Zuverlässigkeit in Straßennetzen [Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 18.0019/2007], Deutschland, Bremen: Fachverl. NW (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1118).
- FRIEDRICH, M.; GALSTER, M. (2008): Anbindungszeiten in Verkehrsnetzen, Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss (Forschung Strassenbau und Straßenverkehrstechnik, 1000).
- FRIEDRICH, M.; JEHLICKA, P.; SCHLAICH, J. (2009): Erfassung von Verkehrsdaten mit automatischen Kennzeichenerfassungssystemen, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Straßenverkehrstechnik, Heft 12, S. 789-795, Kirschbaum Verlag, Bonn.
- GALSTER, M. (2009): Modellierung von Anbindungen in Verkehrsplanungsmodellen.
- GEISTEFELDT, J. (2005): Schätzung von Reisezeiten auf Autobahnen unter Verwendung eines erweiterten Verkehrsflussmodells, Tagungsband zur HEUREKA.
- GEISTEFELDT, J.; GUILIANI, S.; BUSCH, F.; SCHENDZIELORZ, T.; HAUG, A.; VORTISCH, P. et al. (2017): HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen, Bremen: Fachverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Verkehrstechnik, Heft V 279).
- GEISTEFELDT, J.; HOHMANN, S.; WU, N. (2014): Ermittlung des Zusammenhangs von Infrastruktur und Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs für den Verkehrsträger Straße. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- KERNER, B.; REHBORN, H.; ALEKSIC, M.; HAUG, A.; LANGE, R. (2000): Verfolgung und Vorhersage von Verkehrsstörungen auf Autobahnen mit ASDA und FOTO im online-Betrieb in der Verkehrsrechnerzentrale Rüsselsheim, Straßenverkehrstechnik 10, 521–527.

- KESTING, A.; TREIBER, M. (2010): Datengestützte Analyse der Stauentstehung und -ausbreitung auf Autobahnen, Straßenverkehrstechnik 1, 5-11.
- LOHMILLER, J. (2014): Qualität des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten von Autobahnen Bewertung unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit und Analyse von Einflussfaktoren. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014, Stuttgart: Inst. für Straßen- und Verkehrswesen (Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 50). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-96577>.
- LOHSE, D. (2011): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung Band 2 ; Verkehrsplanung, 3. Aufl., s.l.: Beuth Verlag GmbH (Beuth Studium). Online verfügbar unter <http://gbv.ebilib.com/patron/FullRecord.aspx?p=2032812>.
- LOMAX, T.; SCHRANK, D.; TURNER, S.; MARGIOTTA, R.; Texas Transportation, I.; Cambridge Systematics, I. (2003): Selecting travel reliability measures.
- MAIER, F.; ROTH, C. (2008): Fahrzeugwiedererkennung unter Verwendung der Signaturen aus Induktivschleifendetektoren. Hg. v. Straßenverkehrstechnik Heft 2/2008.
- MARGREITER, M.; SPANGLER, M.; ZEH, T.; CARSTENSEN, C. (2015): Bluetooth-Measured Travel Times for Dynamic Re-Routing.
- OTTERSTÄTTER, T.; SCHLAICH, J.; MESCHINI, L. (2013): Offline trifft Online – Verkehrsprognosen in Echtzeit, Straßenverkehrstechnik, Straßenverkehrstechnik Heft 5, 2013.
- REHBOHN, H.; HAUG, A.; KERNER, M.; ALEKSIC, M.; FASTENRATH, U. (2003): Floating Car Data und Verfahren zur Erkennung und Verfolgung von zeitlich-räumlichen Verkehrsmustern, Straßenverkehrstechnik Heft 09/2003.
- ROUPHAIL, N.; SCHROEDER, B.; EADS, B. (2011): HCM2010 Chapter 10 Freeway Facilities User's Guide to FREEVAL2010. HCM2010.
- RWS (20XX): Entwurf der Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- SCHLAICH, J.; OTTERSTÄTTER, T.; FRIEDRICH, M. (2011): Mobilfunkdaten im Verkehrswesen. Hg. v. Straßenverkehrstechnik Heft 2 und Heft 3.
- SCHLEUPEN, G. (2004): Aufbau von Luftlinienmatrizen für die Kategorisierung und Bewertung von Verkehrsnetzen. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Straßen- und Verkehrswesen Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik.
- SCHRECKENBERG, M.; CHROBOK, R.; HAFSTEIN, S.; POTTMEIER, A. (2005): OLSIM-Traffic Forecast and Planning using Simulations, In ASIM (Vol. 17, pp.11-18).
- SHRP 2 L08 (2012): Level of Service Concepts for Travel Time Reliability. Hg. v. Strategic Highway research program (SHRP) 2 L08, Transportation research Board Washington D.C.
- SIGNIFICANCE, G. C.; NEA (2012): Erfassung des Indikators Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung: Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.
- SPANGLER, M. (2009): Reisezeitbasierte Verfahren für die Verkehrszustandsanalyse von städtischen Hauptverkehrsstraßen. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2009, München: Lehrstuhl für Verkehrstechnik Techn. Univ (Schriftenreihe/ Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München, 11).
- STEINHART, M. (2015): Wie sind Funkzellen und Mobilfunknetze beschaffen? Online verfügbar unter <http://informationszentrum-mobilfunk.de/wie-sind-funkzellen-und-mobilfunknetze-beschaffen#header>.
- TU, H. (2008): Monitoring travel time reliability on freeways. Zugl.: Delft, Techn. Univ., Diss., 2008, Delft: TRAIL Research School.
- VAN LINT, J.W.C.; VAN ZUYLEN, H. J.; TU, H. (2008): Travel time unreliability on freeways Why measures based on variance tell only half the story, Transportation Research Part A: Policy and Practice 42, S. 258–277.
- ZURLINDEN, H. (2003): Ganzjahresanalyse des Verkehrsflusses auf Straßen. Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2003, Bochum: Lehrstuhl für Ver-

kehrswesen Ruhr-Universität (Schriftenreihe/ Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, H. 26).

## Bilder

- Bild 1-1: Überblick über die Vorgehensweise
- Bild 2-1: Ansätze zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit FRIEDRICH et al. (2015)
- Bild 2-2: Zusammenhang zwischen der Bewertung der Verkehrsqualität von Einzelanlagen (QSV) und der Bewertung der Angebotsqualität von Netzabschnitten (SAQ<sub>N</sub>) für den Kfz-Verkehr gemäß dem HBS sowie der Bewertung der Angebotsqualität von Verbindungen (SAQV) gemäß den RIN (2008). Bildquelle HBS (2015).
- Bild 2-3: Qualitätsstufen für die Luftliniengeschwindigkeit im Pkw-Verkehr nach RIN (2008, Bild 15)
- Bild 2-4: Qualitätsstufen zur Bewertung der Umwegfaktoren nach RIN (2008, Bild 26)
- Bild 2-5: Klassen von Fahrzeitermittlungsmodellen im Individualverkehr
- Bild 2-6: Zeitlich-räumliche Betrachtung von Einzelfahrzeugen (eigene Abbildung)
- Bild 2-7: Zellularer Aufbau eines Mobilfunknetzes. Quelle; Do-iT (2008. Bild 1)
- Bild 2-8: Fahrzeiten zwischen Stuttgart und Waldorf (über Karlsruhe) und Aufteilung in die Fahrzeugklassen Pkw und Lkw (SCHLAICH et al. (2011))
- Bild 2-9: Schematischer Ablauf einer Kennzeichenerkennung (FRIEDRICH et al. (2009))
- Bild 2-10: Repräsentative Zeit-Weg-Trajektorien in einer Heatmap, in der Geschwindigkeiten abhängig von Ort und Zeit eingetragen werden
- Bild 3-1: Lage der ANPR-Messstellen © OpenStreetMap-Mitwirkende
- Bild 3-2: Ergebnisse der ANPR-Fahrzeitmessungen und der Messfahrten. Einzelwerte und Perzentile bezogen auf die Einfahrzeit am Startquerschnitt
- Bild 3-3: Vergleich zwischen den ANPR-Perzentilen und Google
- Bild 3-4: Vergleich ANPR, Google, HERE (75 %), INRIX und TomTom (75 %)
- Bild 3-5: Vergleich ANPR, Google, HERE (Median), INRIX und TomTom (Median)
- Bild 3-6: Start- bzw. Endpunkte (links Stuttgart, rechts Karlsruhe) © OpenStreetMap-Mitwirkende
- Bild 3-7: Route der Messfahrzeuge mit Messquerschnitten © OpenStreetMap-Mitwirkende
- Bild 3-8: Vergleich der Messfahrten – Google für die Route A8 Stuttgart – Karlsruhe: Absolute Abweichungen mit GEH-Werten (oben), relative Abweichungen mit GEH-Werten (unten)
- Bild 3-9: Vergleich der Messfahrten – Google für die Route A8 Karlsruhe – Stuttgart: Absolute Abweichungen mit GEH-Werten (oben), relative Abweichungen mit GEH-Werten (unten).
- Bild 3-10: Vergleich der Fahrzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe)
- Bild 3-11: Vergleich der Fahrzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe)
- Bild 3-12: Vergleich der Fahrzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe)
- Bild 3-13: Vergleich der Fahrzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe)
- Bild 3-14: Vergleich der Fahrzeiten für den Mittelwert (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe)
- Bild 3-15: Vergleich der Fahrzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart)
- Bild 3-16: Vergleich der Fahrzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart)

- Bild 3-17: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart)
- Bild 3-18: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart)
- Bild 3-19: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart)
- Bild 3-20: Paarweiser Vergleich der Fahrtzeiten der Datenanbieter für die 16 Relationen mit dem GEH-Wert differenziert nach Relationen
- Bild 3-21: Paarweiser Vergleich der Fahrtzeiten der Datenanbieter für die 16 Relationen mit dem GEH-Wert differenziert nach Anbieter-Paaren.
- Bild 4-1: Relationen der Verbindungsfunktionsstufe 0 für Nachbarschaftsgrad 1 (Bild links); Relationen der Verbindungsfunktionsstufe I für Nachbarschaftsgrad 1 (Bild rechts).
- Bild 4-2: Relationen der Verbindungsfunktionsstufe II für Nachbarschaftsgrad 1 (Bild links); Relationen der Verbindungsfunktionsstufe III für Nachbarschaftsgrad 1 (Bild rechts).
- Bild 4-3: Beispielrelation mit Luftlinienverbindung über Ausland
- Bild 4-4: Verbindungsfunktionsstufe I mit Nachbarschaftsgrad 1 ohne Berücksichtigung der zentralen Orte im Ausland (links) und mit Berücksichtigung der zentralen Orte im Ausland (rechts)
- Bild 4-5: Beispielrelation mit Route über Ausland
- Bild 4-6: Zentrale Orte in Deutschland und im Ausland
- Bild 4-7: Relationen mit einer Luftlinienentfernung zwischen 5 und 100 km
- Bild 4-8: Relationen mit einer Luftlinienentfernung zwischen 200 und 500 km
- Bild 4-9: Verteilung der Luftlinienentfernung für die ausgewählten Relationen
- Bild 5-1: Verteilung der Anbindungen auf die Functional-Road-Class
- Bild 5-2: Auszug aus der Quelle-Ziel-Matrix für die Auswahl der Relationen (Matrixwert > 1)
- Bild 5-3: Vergleich der Berechnungsmethoden (x-Achse: statisch, y-Achse dynamisch)
- Bild 5-4: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten für das 50%-Perzentil der Streckengeschwindigkeiten für vier Tageszeiträume
- Bild 5-5: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten für das 75%-Perzentil der Streckengeschwindigkeiten für vier Tageszeiträume
- Bild 5-6: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten für das 90%-Perzentil der Streckengeschwindigkeiten für vier Tageszeiträume
- Bild 5-7: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten für den Mittelwert der Streckengeschwindigkeiten für vier Tageszeiträume
- Bild 5-8: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten (VL) für den Best-Guess-Wert für fünf Tageszeiträume 07:00, 10:00, 17:00, 20:00 und Sonntag 07:00 Uhr
- Bild 5-9: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten (VL) für den Best-Guess-, den Pessimistic- und den Optimistic-Wert für zwei Tageszeiträume 07:00 und 10:00 Uhr
- Bild 5-10: Summenhäufigkeit der Luftliniengeschwindigkeiten (VL) für den Best-Guess-Wert für sechs Tageszeiträume 04:00, 06:00, 07:00, 08:00, 14:00 und 18:00 Uhr
- Bild 5-11: Anteile der SAQ-Werte der Luftliniengeschwindigkeit für jede Pkw-Fahrtzeitausprägung nach RIN (2008)
- Bild 5-12: Anteile der SAQ-Werte der Luftliniengeschwindigkeit nur für die Mittelwerte der Pkw-Fahrtzeitausprägungen nach RIN (2008)

- Bild 5-13: Mittlere Verlustzeiten pro Kilometer [s/km] für jede Pkw-Fahrtzeitausprägung
- Bild 5-14: Mittlere jährliche Verlustzeiten pro Pkw-Nutzer [h/a] für jede Pkw-Fahrtzeitausprägung
- Bild 5-15: Verteilungen des Fahrtzeitindex für die Datenquellen TomTom und Google
- Bild 5-16: Verteilungen des Fahrtzeitindex für die Ist-Fahrtzeit (7:00 Uhr,  $p = 50\%$ ) für die Datenquelle TomTom differenziert nach sechs Entfernungsklassen
- Bild 5-17: Verteilungen des Fahrtzeitindex Best-Guess für die Datenquelle Google differenziert nach sechs Entfernungsklassen
- Bild 5-18: Verteilungen des Fahrtzeitindex  $p = 75\%$  für die Datenquelle TomTom differenziert nach sechs Entfernungsklassen
- Bild 5-19: Verteilungen des Fahrtzeitindex Pessimistic für die Datenquelle Google differenziert nach sechs Entfernungsklassen
- Bild 5-20: TomTom-Netz mit Zentralitäten
- Bild 5-21: Anteil  $p_s^{Hits}$  der Verkehrsleistung je Strecke bezogen auf die TomTom Hits  $q_s^{Hits}$
- Bild 5-22: Anteil  $p_s^{VFS}$  der Verkehrsleistung je Strecke bezogen auf die VFS-Umlegung  $q_s^{VFS}$
- Bild 5-23: Verhältnis von  $p_s^{Hits} / p_s^{VFS}$ . Auf den rot gekennzeichneten Strecken ist der Anteil der realen Nachfrage deutlich höher als der Anteil der Nachfrage der ausgewählten Relationen.
- Bild 5-24: Mittlere Verlustzeiten pro Kilometer [s/km] im Pkw-Verkehr für die Ist-Fahrtzeitausprägungen  $t^{Mean}$  und die Soll-Fahrtzeitausprägungen  $t_{20:00}^{P15}$ ,  $t_{20:00}^{P50}$ ,  $t^{Free}$ . Die Verlustzeiten sind nach der Soll-Fahrtzeit sortiert.
- Bild 5-25: Mittlere jährliche Verlustzeiten pro Pkw-Nutzer [h/a] für die Ist-Fahrtzeitausprägungen  $t^{Mean}$  und die Soll-Fahrtzeitausprägungen  $t_{20:00}^{P15}$ ,  $t_{20:00}^{P50}$ ,  $t^{Free}$ . Die Verlustzeiten sind nach der Soll-Fahrtzeit sortiert.
- Bild 5-26: Fahrtzeitindex für  $t_{07:00}^{Mean} / t_{20:00}^{P50}$
- Bild 5-27: Fahrtzeitindex für  $t_{10:00}^{Mean} / t_{20:00}^{P50}$
- Bild 5-28: Fahrtzeitindex für  $t_{07:00}^{Mean} / t^{Free}$
- Bild 5-29: Fahrtzeitindex für  $t_{10:00}^{Mean} / t^{Free}$
- Bild 5-30: Vergleich der mittleren Verlustzeiten pro Kilometer [s/km] im Pkw-Verkehr für die ausgewählten Relationen und das Streckennetz für die Ist-Fahrtzeitausprägungen  $t^{Mean}$  und die Soll-Fahrtzeitausprägungen  $t_{20:00}^{P50}$ . Die Verlustzeiten sind nach der Tageszeit sortiert.
- Bild 6-1: SAQ-Referenzkurven der Luftliniengeschwindigkeit (Diagramm oben), erweitert um zwei weitere SAQ-Kurven A+/A und F/F+ (Diagramm unten)
- Bild 6-2: Referenzkurven mit gleichabständigen Unterklassen
- Bild 6-3: Häufigkeit der Stufen der Angebotsqualität der Analysedatenquelle bei der Verwendung von 6 SAQ-Kurven A – F
- Bild 6-4: Häufigkeit der Stufen der Angebotsqualität der Analysedatenquelle bei der Verwendung von 24 SAQ-Kurven A1 – F4
- Bild 6-5: Abweichung der SAQ-Werte der Analysedatenquelle von der Referenzdatenquelle bei der Verwendung von 6 SAQ-Stufen A – F. Die fünf Entfernungsklassen sind so gewählt, dass jede Klasse die gleiche Anzahl von Relationen enthält.
- Bild 6-6: Abweichung der SAQ-Werte der Analysedatenquelle von der Referenzdatenquelle bei der Verwendung von 24 SAQ-Stufen A1 – F4. Die fünf Entfernungsklassen sind so gewählt, dass jede Klasse die gleiche Anzahl von Relationen enthält.
- Bild 6-7: Abweichung der SAQ-Werte mit Fahrtzeitkorrektur ( $f_1 = 0,91$ ;  $f_2 = 0,1$ ;  $f_3 = -0,02$ ; Abweichungsmaß = 1,5) bei der Verwendung von 6 SAQ-Stufen A – F. Die fünf Entfernungsklassen sind so gewählt, dass jede Klasse die gleiche Anzahl von Relationen enthält.

- Bild 6-8: Abweichung der SAQ-Werte mit Fahrtzeitkorrektur ( $f_1 = 0,91$ ;  $f_2 = 0,1$ ;  $f_3 = -0,02$ ; Abweichungsmaß = 1,5) bei der Verwendung von 24 SAQ-Stufen A1 – F4. Die fünf Entfernungsklassen sind so gewählt, dass jede Klasse die gleiche Anzahl von Relationen enthält.
- Bild 6-9: Einteilung der Datenquelle in SAQ-Werte A – F nach der Fahrtzeitkorrektur
- Bild 6-10: Einteilung der Datenquelle in SAQ-Werte A1 – F4 nach der Fahrtzeitkorrektur
- Bild 7-1: Funktion für die Berechnung der SAQ-Kurven der Luftliniengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung (Quelle: RIN (FGSV 2008. Bild 26))
- Bild 7-2: SAQ-Referenzkurven B/C im Entfernungsbereich 0-500 km
- Bild 7-3: SAQ-Referenzkurven B/C im Entfernungsbereich 0-50 km
- Bild 7-4: SAQ-Referenzkurven HVZ ohne Störung  

$$\text{MAX} \left( t_{TomTom,07:00}^{P50}, t_{TomTom,17:00}^{P50} \right)$$
(A = 25 %)
- Bild 7-5: SAQ-Referenzkurven HVZ ohne Störung  

$$\text{MAX} \left( t_{TomTom,07:00}^{P50}, t_{TomTom,17:00}^{P50} \right)$$
(A = 16,5 %)
- Bild 7-6: SAQ-Referenzkurven HVZ ohne Störung  

$$\text{MAX} \left( t_{TomTom,07:00}^{P50}, t_{TomTom,17:00}^{P50} \right)$$
(A = 12,5 %)
- Bild 7-7: SAQ-Referenzkurven HVZ mit Störung  

$$\text{MAX} \left( t_{TomTom,07:00}^{P75}, t_{TomTom,17:00}^{P75} \right)$$
(A = 25 %)
- Bild 7-8: SAQ-Referenzkurven HVZ mit Störung  

$$\text{MAX} \left( t_{TomTom,07:00}^{P75}, t_{TomTom,17:00}^{P75} \right)$$
(A = 16,5 %)
- Bild 7-9: SAQ-Referenzkurven HVZ mit Störung  

$$\text{MAX} \left( t_{TomTom,07:00}^{P75}, t_{TomTom,17:00}^{P75} \right)$$
(A = 12,5 %)
- Bild 7-10: SAQ-Referenzkurven SVZ  $t_{TomTom,20:00}^{P50}$  (A = 25 %)
- Bild 7-11: SAQ-Referenzkurven SVZ  $t_{TomTom,20:00}^{P50}$  (A = 16,5 %)
- Bild 7-12: SAQ-Referenzkurven SVZ  $t_{TomTom,20:00}^{P50}$  (A = 12,5 %)
- Bild 7-13: SAQ-Referenzkurven Validate unbelastet (A = 25 %)
- Bild 7-14: SAQ-Referenzkurven Validate unbelastet (A = 16,5 %)
- Bild 7-15: SAQ-Referenzkurven Validate unbelastet (A = 12,5 %)
- Bild 7-16: SAQ-Referenzkurven Validate belastet (A = 25 %)
- Bild 7-17: SAQ-Referenzkurven Validate belastet (A = 16,5 %)
- Bild 7-18: SAQ-Referenzkurven Validate belastet (A = 12,5 %)
- Bild 7-19: Funktion für die Berechnung der SAQ-Kurven der Umwegfaktoren in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung (Quelle: RIN (FGSV 2008. Bild 32))
- Bild 7-20: Bewertungskurven zur Bewertung der Umwegfaktoren
- Bild 7-21: Funktion für die Berechnung der Anteile der FRC an der Fahrtweite in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung
- Bild 7-22: Anteile der Fahrtweite je Entfernungsklasse differenziert nach FRC
- Bild 7-23: Anteil der Fahrtweite (links) und absolute Fahrtweite (rechts) je Entfernungsklasse für FRC 0 und FRC 1
- Bild 7-24: Anteil der Fahrtweite (links) und absolute Fahrtweite (rechts) je Entfernungsklasse für FRC 2, FRC 3 und FRC 4
- Bild 7-25: Anteil der Fahrtweite (links) und absolute Fahrtweite (rechts) je Entfernungsklasse für FRC 5, FRC 6 und FRC 7
- Bild 7-26: Funktion für die Berechnung der Anbindungszeit zwischen 0 und 150 km Luftlinienweite
- Bild 7-27: Anbindungszeit je Entfernungsklasse für beobachtete und modellierte Werte

Bild 7-28: Funktion für die Berechnung der Fahrweite und Reisezeit einer Relation in Abhängigkeit der Luftlinienentfernung

Bild 7-29: Vergleich der Referenzkurven B/C aus empirischen Reisezeiten und theoretischen Reisezeiten im Entfernungsbereich 0-500 km

Bild 7-30: Theoretische SAQ-Referenzkurven Hauptverkehrszeit ohne zufällige Störungen

Bild 7-31: Theoretische SAQ-Referenzkurven Hauptverkehrszeit mit zufälligen Störungen

Bild 7-32: Theoretische SAQ-Referenzkurven Schwachverkehrszeit

Tab. 2-9: Zugangszeit, Abgangszeit und Parksuchzeit im Pkw-Verkehr nach RIN (2008, Tabelle 21)

Tab. 3-1: Methoden und Datenquellen zur Ermittlung von Fahrtzeiten für ausgewählte Relationen

Tab. 3-2: Testrelationen

Tab. 3-3: Summe der Abweichungen in Sekunden zwischen dem Perzentil-Werten der ANPR-Messung und den Google-Werten.

Tab. 3-4: Abfahrtszeitpunkte der Messfahrzeuge

Tab. 3-5: GEH für den Vergleich der Messfahrten – Google

Tab. 3-6: Vergleich der mittleren Fahrtzeiten [min] eines Tages (04:00 bis 22:00 Uhr) für verschiedene Fahrtzeitausprägungen. Die mittlere Fahrtzeit des Tages ergibt sich zeitgewichtet aus den Stundenwerten

## Tabellen

Tab. 2-1: Bezeichnung von Fahrtzeiten

Tab. 2-2: Kriterien zur Beschreibung der Verkehrsqualität für verschiedene Einzelanlagen nach HBS (2015)

Tab. 2-3: Stufen der Angebotsqualität eines Netzabschnitts (SAQN) in Abhängigkeit vom Fahrtgeschwindigkeitsindex nach HBS (2015)

Tab. 2-4: Verbindungsfunktionsstufen für Verbindungen nach RIN (2008, Tabelle 4)

Tab. 2-5: Angestrebte mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten nach RIN (2008, Tabelle 13)

Tab. 2-6: Verfahren der Fahrzeitermittlung (abgeleitet aus FRIEDRICH et al. (2015))

Tab. 2-7: Bewertung der Verfahren der Fahrzeitermittlung für die Ermittlung von Fahrtzeiten und Fahrtzeitverteilungen auf Teilstrecken, Strecken, Netzabschnitten und Relationen im Autobahnnetz

Tab. 2-8: Übersicht über FCD-Datenquellen und Dateninhalte (Stand: Juli 2018)

Tab. 3-7: Vergleich der mittleren Verlustzeiten pro Kilometer [s/km] über einen Tag (04:00 bis 22:00 Uhr) für verschiedene Ausprägungen der Soll-Fahrtzeit und der Ist-Fahrtzeit

Tab. 3-8: Mittlere GEH-Werte über alle Relationen für den paarweisen Vergleich der Fahrtzeiten der Datenanbieter

Tab. 4-1: Aufbau und Inhalte eines Datensatzes

Tab. 4-2: Zuordnung der ausländischen Städte zu den Zentralitäten auf Grundlage der Einwohnerzahlen

Tab. 4-3: Anzahl der zentralen Orte in Deutschland und im Ausland

Tab. 4-4: Übersicht über die ausgewählten Relationen

Tab. 5-1: Beschreibung des Streckenattributs Functional-Road-Class

Tab. 5-2: Statistik zur Auswahl des Streckennetzes

- Tab. 5-3: Zuweisung der Zeiträume des Tages zu den verfügbaren Zeiträumen
- Tab. 5-4: Längenanteile der ausgewählten Relationen differenziert nach Straßenfunktionsklasse
- Tab. 6-1: Parameter der SAQ-Funktionen
- Tab. 6-2: Empfohlene Suchbereiche und Schrittweiten für die Anpassungsparameter  $f_1$ - $f_3$
- Tab. 6-3: Getestete Kombinationen von Fahrtzeitausprägungen der Referenz- und Analysedatenquellen
- Tab. 6-4: Abstandsmaß  $g$  ohne Fahrtzeitkorrektur (links) und mit Fahrtzeitkorrektur (rechts) für die untersuchten Kombinationen von Fahrtzeitausprägungen
- Tab. 6-5:  $f$ -Parameter der Fahrtzeitanpassung zwischen verschiedenen Referenz- und Analysedatenquellen für die untersuchten Kombinationen
- Tab. 6-6: Quotient aus  $g+$  und  $g$  ohne Fahrtzeitkorrektur (links) und mit Fahrtzeitkorrektur (rechts) für die untersuchten Kombinationen
- Tab. 7-1: Mögliche Vorgaben der Anteile für die Schätzung der A/B-Kurve
- Tab. 7-2: Parameter der SAQ-Kurven des Umwegfaktors für Luftlinienentfernung von 0 bis 500 km
- Tab. 7-3: Verteilung der Relationen der Datenbasis auf die Bewertungsstufen differenziert nach Entfernungsklassen
- Tab. 7-4: Parameter der Anteile der FRC an der Fahrtweite
- Tab. 7-5: Zuordnung von Fahrtgeschwindigkeiten zu FRC (angelehnt an Tabelle 13, RIN (2008))
- Tab. 7-6: Faktor zur Anpassung der Fahrtzeit abhängig  $f_{k,z}^{Konst}$  von der Qualitätsstufe  $k$  und vom Verkehrszustand  $z$

## Im Anhang

### Bilder

- Bild 13-1: Vergleich Messfahrten – HERE: GEH-Werte (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-2: Vergleich Messfahrten – HERE: GEH-Werte (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-3: Vergleich Messfahrten – HERE: GEH-Werte (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).
- Bild 13-4: Vergleich Messfahrten – HERE: GEH-Werte (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).
- Bild 13-5: Vergleich Messfahrten – INRIX: GEH-Werte (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-6: Vergleich Messfahrten – INRIX: GEH-Werte (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-7: Vergleich Messfahrten – INRIX: GEH-Werte (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).
- Bild 13-8: Vergleich Messfahrten – INRIX: GEH-Werte (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).
- Bild 13-9: Vergleich Messfahrten – TomTom: GEH-Werte (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-10: Vergleich Messfahrten – TomTom: GEH-Werte (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-11: Vergleich Messfahrten – TomTom: GEH-Werte (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).
- Bild 13-12: Vergleich Messfahrten – TomTom: GEH-Werte (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).
- Bild 13-13: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – München).

- Bild 13-14: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – München).
- Bild 13-15: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – München).
- Bild 13-16: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – München).
- Bild 13-17: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A8 Stuttgart – München).
- Bild 13-18: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A8 München – Stuttgart).
- Bild 13-19: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A8 München – Stuttgart).
- Bild 13-20: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A8 München – Stuttgart).
- Bild 13-21: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A8 München – Stuttgart).
- Bild 13-22: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A8 München – Stuttgart).
- Bild 13-23: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A3 Frankfurt – Köln).
- Bild 13-24: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A3 Frankfurt – Köln).
- Bild 13-25: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A3 Frankfurt – Köln).
- Bild 13-26: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A3 Frankfurt – Köln).
- Bild 13-27: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A3 Frankfurt – Köln).
- Bild 13-28: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A3 Köln – Frankfurt).
- Bild 13-29: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A3 Köln – Frankfurt).
- Bild 13-30: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A3 Köln – Frankfurt).
- Bild 13-31: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A3 Köln – Frankfurt).
- Bild 13-32: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A3 Köln – Frankfurt).
- Bild 13-33: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-34: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-35: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-36: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-37: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A8 Stuttgart – Karlsruhe).
- Bild 13-38: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).
- Bild 13-39: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).
- Bild 13-40: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).
- Bild 13-41: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).

- Bild 13-42: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A8 Karlsruhe – Stuttgart).
- Bild 13-43: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A1 Köln – Dortmund).
- Bild 13-44: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A1 Köln – Dortmund).
- Bild 13-45: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A1 Köln – Dortmund).
- Bild 13-46: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A1 Köln – Dortmund).
- Bild 13-47: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A1 Köln – Dortmund).
- Bild 13-48: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A1 Dortmund – Köln).
- Bild 13-49: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A1 Dortmund – Köln).
- Bild 13-50: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A1 Dortmund – Köln).
- Bild 13-51: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A1 Dortmund – Köln).
- Bild 13-52: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A1 Dortmund – Köln).
- Bild 13-53: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A14 Leipzig – Dresden).
- Bild 13-54: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A14 Leipzig – Dresden).
- Bild 13-55: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A14 Leipzig – Dresden).
- Bild 13-56: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A14 Leipzig – Dresden).
- Bild 13-57: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A14 Leipzig – Dresden).
- Bild 13-58: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A14 Dresden – Leipzig).
- Bild 13-59: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A14 Dresden – Leipzig).
- Bild 13-60: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A14 Dresden – Leipzig).
- Bild 13-61: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A14 Dresden – Leipzig).
- Bild 13-62: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A14 Dresden – Leipzig).
- Bild 13-63: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: B523 Villingen – Sigmaringen).
- Bild 13-64: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: B523 Villingen – Sigmaringen).
- Bild 13-65: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: B523 Villingen – Sigmaringen).
- Bild 13-66: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: B523 Villingen – Sigmaringen).
- Bild 13-67: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: B523 Villingen – Sigmaringen).
- Bild 13-68: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: B523 Sigmaringen – Villingen).
- Bild 13-69: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: B523 Sigmaringen – Villingen).
- Bild 13-70: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: B523 Sigmaringen – Villingen).

- Bild 13-71: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: B523 Sigmaringen – Villingen).
- Bild 13-72: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: B523 Sigmaringen – Villingen).
- Bild 13-73: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A45 Gießen – Herborn).
- Bild 13-74: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A45 Gießen – Herborn).
- Bild 13-75: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A45 Gießen – Herborn).
- Bild 13-76: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A45 Gießen – Herborn).
- Bild 13-77: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A45 Gießen – Herborn).
- Bild 13-78: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A45 Herborn – Gießen).
- Bild 13-79: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A45 Herborn – Gießen).
- Bild 13-80: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A45 Herborn – Gießen).
- Bild 13-81: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A45 Herborn – Gießen).
- Bild 13-82: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A45 Herborn – Gießen).
- Bild 13-83: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A94 Erding – Ebersberg).
- Bild 13-84: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A94 Erding – Ebersberg).
- Bild 13-85: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A94 Erding – Ebersberg).
- Bild 13-86: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A94 Erding – Ebersberg).
- Bild 13-87: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A94 Erding – Ebersberg).
- Bild 13-88: Vergleich der Fahrtzeiten für die 90%-Perzentile (Route: A94 Ebersberg – Erding).
- Bild 13-89: Vergleich der Fahrtzeiten für die 75%-Perzentile (Route: A94 Ebersberg – Erding).
- Bild 13-90: Vergleich der Fahrtzeiten für die 50%-Perzentile (Route: A94 Ebersberg – Erding).
- Bild 13-91: Vergleich der Fahrtzeiten für die 25%-Perzentile (Route: A94 Ebersberg – Erding).
- Bild 13-92: Vergleich der Fahrtzeiten für den Mittelwert (Route: A94 Ebersberg – Erding).
- Bild 13-93: SAQ-Referenzkurven B/C im Entfernungsbereich 0-500 km für den Lkw
- Bild 13-94: SAQ-Referenzkurven B/C im Entfernungsbereich 0-50 km für den Lkw
- Bild 13-95: SAQ-Referenzkurven für den Lkw  

$$MAX \left( t_{TomTom,07:00}^{P50}, t_{TomTom,17:00}^{P50} \right)$$
(A=16,5 %)
- Bild 13-96: SAQ-Referenzkurven für den Lkw  

$$MAX \left( t_{TomTom,07:00}^{P75}, t_{TomTom,17:00}^{P75} \right)$$
(A=16,5 %)
- Bild 13-97: SAQ-Referenzkurven für den Lkw  

$$t_{TomTom,20:00}^{P50} \text{ (A=16,5 \%)}$$
- Bild 13-98: SAQ-Referenzkurven für den Lkw  

$$MAX \left( t_{TomTom,07:00}^{Mean}, t_{TomTom,17:00}^{Mean} \right)$$
(A=16,5 %)
- Tabellen**
- Tab. 13-1: Beschreibung der Spaltenüberschriften der Datenbasis und deren Bedeutung
- Tab. 13-2: Aufbau des Bezeichners

- Tab. 13-3: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t_{20:00}^{P50}$  und  $t_i^{Curr} = t_{07:00}^{Mean}$
- Tab. 13-4: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t_{20:00}^{P15}$  und  $t_i^{Curr} = t_{07:00}^{Mean}$
- Tab. 13-5: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t^{Free}$  und  $t_i^{Curr} = t_{07:00}^{Mean}$
- Tab. 13-6: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t_{20:00}^{P50}$  und  $t_i^{Curr} = t_{10:00}^{Mean}$
- Tab. 13-7: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t_{20:00}^{P15}$  und  $t_i^{Curr} = t_{10:00}^{Mean}$
- Tab. 13-8: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t^{Free}$  und  $t_i^{Curr} = t_{10:00}^{Mean}$
- Tab. 13-9: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t_{20:00}^{P50}$  und  $t_i^{Curr} = t_{17:00}^{Mean}$
- Tab. 13-10: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t_{20:00}^{P15}$  und  $t_i^{Curr} = t_{17:00}^{Mean}$
- Tab. 13-11: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t^{Free}$  und  $t_i^{Curr} = t_{17:00}^{Mean}$
- Tab. 13-12: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t_{20:00}^{P50}$  und  $t_i^{Curr} = t_{20:00}^{Mean}$
- Tab. 13-13: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t_{20:00}^{P15}$  und  $t_i^{Curr} = t_{20:00}^{Mean}$
- Tab. 13-14: Mittlere Verlustzeit [s/km] für  
 $t^{Target} = t^{Free}$  und  $t_i^{Curr} = t_{20:00}^{Mean}$
- Tab. 13-15: Parameter der SAQ-Funktionen HVZ  
ohne Störung (A=25 %)
- Tab. 13-16: Parameter der SAQ-Funktionen HVZ  
ohne Störung (A=16,5 %)
- Tab. 13-17: Parameter der SAQ-Funktionen HVZ  
ohne Störung (A=12,5 %)
- Tab. 13-18: Parameter der SAQ-Funktionen HVZ  
mit Störung (A=25 %)
- Tab. 13-19: Parameter der SAQ-Funktionen HVZ  
mit Störung (A=16,5 %)
- Tab. 13-20: Parameter der SAQ-Funktionen HVZ  
mit Störung (A=12,5 %)
- Tab. 13-21: Parameter der SAQ-Funktionen SVZ  
(A=25 %)
- Tab. 13-22: Parameter der SAQ-Funktionen SVZ  
(A=16,5 %)
- Tab. 13-23: Parameter der SAQ-Funktionen SVZ  
(A=12,5 %)
- Tab. 13-24: Parameter der SAQ-Funktionen  
Validate unbelastet (A=25 %)
- Tab. 13-25: Parameter der SAQ-Funktionen  
Validate unbelastet (A=16,5 %)
- Tab. 13-26: Parameter der SAQ-Funktionen  
Validate unbelastet (A=12,5 %)
- Tab. 13-27: Parameter der SAQ-Funktionen  
Validate belastet (A=25 %)
- Tab. 13-28: Parameter der SAQ-Funktionen  
Validate belastet (A=16,5 %)
- Tab. 13-29: Parameter der SAQ-Funktionen  
Validate belastet (A=12,5 %)
- Tab. 13-30: Parameter der SAQ-Funktionen Lkw  
HVZ ohne Störungen (A=16,5 %)
- Tab. 13-31: Parameter der SAQ-Funktionen Lkw  
HVZ mit Störungen (A=16,5 %)
- Tab. 13-32: Parameter der SAQ-Funktionen Lkw  
SVZ (A=16,5 %)
- Tab. 13-33: Parameter der SAQ-Funktionen Lkw  
HVZ Mittelwert (A=16,5 %)

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2020

- V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**  
Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00
- V 324: **Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**  
Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckließ, Schimpf, Schmotz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 325: **Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**  
D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 326: **Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**  
Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50
- V 327: **Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**  
Frenken, Mahmoudi € 16,50
- V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**  
Meisel, Balzer-Hebborn, Ellmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 329: **Streckenbezogene Glättevorhersage**  
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50
- V 330: **Führung des Radverkehrs an Landstraßen**  
Baier, Leu, Rittershaus  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 331: **Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**  
Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00
- V 332: **Räumliche Linienführung von Autobahnen**  
Lippold, Zösch  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 333: **Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit**  
Hänisch, Heidebrunn € 17,00
- V 334: **Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**  
Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00
- V 335: **Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen**  
Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00
- V 336: **Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten**  
Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50
- V 337: **Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung**  
Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50

## 2021

- V 338: **Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs**  
Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 339: **Aktualisierung der Datenbank MARLIS**  
Schneider, Turhan, Pelzer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 340: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017**  
Fitschen, Nordmann € 31,00
- V 341: **Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen**  
Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 342: **Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz**  
Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 21,00
- V 343: **Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit**  
Schmotz, Schröter, Schemmel, Lippold, Schulze € 21,50
- V 344: **Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen**  
Popp, Eggers, Heidebrunn, Cortes € 21,00
- V 345: **Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissionsdaten der Straße und meteorologischen Daten**  
Liepert, Skowronek, Eberlei, Crijenkovic, Müller, Schady, Elsen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 346: **Zusammenhang reduzierter Geräuschgrenzwerte mit den in-use Geräuschemissionen bei unterschiedlichen Verkehrssituationen**  
Müller, Huth, Liepert € 15,00
- V 347: **Chancen in der Verkehrsbeeinflussung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation**  
Schwietering, Löbbering, Spangler, Gabloner, Busch, Roszak, Dobmeier, Neumann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 348: **Einsatz und Verkehrssicherheit von Fußgängerüberwegen**  
Bohle, Busek, Schröder € 18,50
- V 349: **Straßenbepflanzung und Verkehrssicherheit – Ermittlung unfallbeeinflussender Merkmale auf Basis empirischer Modelle unter besonderer Berücksichtigung der Bepflanzung im Seitenraum an Landstraßen**  
Schreck-von Below € 22,00
- V 350: **Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**  
Bartolomaeus, Strigari, Sammet  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 351: **Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Streustofflagerung – TAUSALA II**  
Holldorb, Cypra, Pape  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**2022**

V 352: **Abriebe von Fahrbahnoberflächen**  
Düring, Schmidt, Johannsen € 19,00

V 353: **Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten**  
Gay, Grimm, Otto, Partzsch, Gersdorf, Gierisch, Löwe, Schütze € 16,00

V 354: **Anwendung der Methode BIM in Konformität mit den Regelwerken der FGSV und des IT-Ko**  
Radenberg, Müller, König, Hagedorn, Geistefeldt, Hohmann, Heinrichs, Stiehler, Kortemeyer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 355: **Pilotversuch des Rechtsabbiegens von Rad Fahrenden bei Rot**  
Niestegge, Schüller, Hantschel, Schröter, Gerike  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 356: **Entwicklung von Einsatzkriterien für Fußgänger-schutzanlagen mit unterschiedlichen Grundstellungen**  
Medicus, Schmotz, Gerike, Reinartz, Baier  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 357: **Qualifizierung der in Deutschland verwendeten Fahrzeug-Rückhaltesysteme mit verbessertem Schutz für Motorradfahrer nach den aktuellen europäischen Spezifikationen**  
Klöckner, Gärtner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 358: **Nutzenpotenziale von eCall im Verkehrsmanagement**  
Schaarschmidt, van Driel, Reinhaller, Nitsche, Aleksa  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 359: **Management von Neophyten – Ein Überblick über die aktuelle Situation auf Straßenbegleitflächen**  
Bartels  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 360: **Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen – Hauptstudie**  
Stephan, Ehm, Kamaruddin  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 361: **Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur**  
Hess, Lohmeier, Mielecke, Kunz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 362: **Simulation des hochautomatisierten Fahrens auf Autobahnen mit kollektiver Streckenbeeinflussung**  
Hilgers, Krabbe, Haug, Grimm, Kutter, Tempelhahn, Schwietering, Füg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 363: **PERTA – Passive Sicherheit in der Straßenausstattung**  
Tomasch, Radeschnig, Dünser, Sinz, Gstrein  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 364: **Verkehrsträgerübergreifender Austausch von Erneuerbarer Energie**  
Chvanova, Haller, Leprich, U. Mayr, C. Mayr, Oßwald, Altröck, Gemmer, Michaels, Wagner € 23,50

V 365: **Bundesweite Verkehrsdaten 2019**  
Schneider, Pelzer, Gallus, Dick, Lensing  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**2023**

V 366: **Akzeptanz und Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen**  
Schüller, Niestegge, Hantschel, Kühn, Gerike, Huber  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 367: **In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen**  
Schulze  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 368: **Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen**  
Friedrich, Bawidamann, Peter, Waßmuth € 20,00

---

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.